

**DETERMINACIÓN DE ZONAS CON MAYOR ESTABILIDAD AMBIENTAL EN EL
COMPLEJO DE PÁRAMOS GUANTIVA LA RUSIA MEDIANTE ÍNDICES
ESPECTRALES**



CAMILA VANESSA VALERO CARVAJAL

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017**

**DETERMINACIÓN DE ZONAS CON MAYOR ESTABILIDAD AMBIENTAL EN EL
COMPLEJO DE PÁRAMOS GUANTIVA LA RUSIA MEDIANTE ÍNDICES
ESPECTRALES**

**Presentado por:
Camila Vanessa Valero Carvajal**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental en la modalidad
de Pasantía**

**Director:
Ronald Jackson Sierra Parada
Ingeniero Topográfico**

**Codirector:
Nelson Andrés Nieto Valencia
Ingeniero Ambiental**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017**

CONTENIDO

RESUMEN	11
1. CAPITULO I - PROYECTO.....	12
1.1. Introducción	12
1.2. Objetivos.....	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
2. CAPÍTULO II - MARCO REFERENCIAL	14
2.1. Marco contextual	14
2.2. Marco teórico	16
2.2.1. Área de estudio – Guantiva La Rusia.....	16
2.2.2. Generalidades de las imágenes satelitales a ser usadas en el proyecto.....	18
2.2.3. Generalidades para la interpretación de la estabilidad ambiental.	19
2.3. Marco conceptual	19
2.3.1. Índice espectral de vegetación.....	19
2.3.3. Imagen satelital	20
2.3.4. Resolución de un sistema sensor.....	21
2.3.5. Banda espectral	22
2.3.7. Biomasa	23
2.3.8. Espectro electromagnético	23
2.4. Marco Legal	24
2.4.1. Normatividad General.	24
2.4.2. Normatividad relacionada con el ordenamiento territorial.	26
2.4.3. Normatividad relacionada a la protección de biomas.	26
3. CAPÍTULO III - DESARROLLO DE LA PASANTÍA	28
3.1. Diseño metodológico	28
3.1.1. Búsqueda de información secundaria	28

3.1.2.	Selección de índices espectrales	29
3.1.3.	Obtención de imágenes satelitales.....	32
3.1.4.	Procesamiento de las imágenes satelitales	34
3.1.5.	Interpretación de las imágenes satelitales	35
3.1.6.	Elaboración de productos cartográficos	35
3.1.6.1.	Creación de un layerstake o capa.....	36
3.1.6.2.	Eliminación de nubes.	37
3.1.6.3.	Recorte de las imágenes.	38
3.1.6.4.	Normalizar los datos de las imágenes.	38
3.1.6.5.	Generar los datos estadísticos.....	38
3.1.7.	Análisis de productos cartográficos.....	39
3.1.8.	Determinación de las zonas con mayor estabilidad ambiental.	39
3.2.	Plan de trabajo.....	40
3.2.1.	Tiempo	40
3.2.2.	Lugar de ejecución.....	41
3.2.3.	Resultados y forma de evaluación de las prácticas	41
4.	CAPÍTULO IV - RESULTADOS OBTENIDOS.....	43
4.1.	Etapa 1: Análisis visual.	43
4.2.	Etapa 2: Análisis estadístico.	44
4.2.1.	Análisis estadístico para el mes de febrero.	45
4.2.2.	Análisis estadístico para el mes de octubre.	48
5.	CONCLUSIONES	51
6.	RECOMENDACIONES	52
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
8.	ANEXOS	57

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Localización del instituto geográfico Agustín Codazzi.....	14
Imagen 2: Ubicación de la zona de estudio del proyecto.....	17
Imagen 3: Conflicto de uso de la tierra en los departamentos de Santander y Boyacá.....	18
Imagen 4: Fórmula para calcular el NDVI	20
Imagen 5: Recorte de una imagen satelital.....	20
Imagen 6: Recorte de una sección de la imagen 3. Matriz de 6x4 pixeles.	21
Imagen 7: Esquema de adquisición y generación de una imagen.....	22
Imagen 8: Espectro del índice de vegetación.	29
Imagen 9: Principio de cálculo de los índices basados en la distancia	30
Imagen 10: Sistema de referencia MODIS para el área continental de Colombia.	32
Imagen 11: Vista de la zona de estudio desde el USGS.	33
Imagen 12: Delimitación de la zona de estudio.....	35
Imagen 13: Condiciones de la capa pixel reliability para las imágenes MODIS MOD13Q1.....	37
Imagen 14: Creación del layerstake en el software PCI Geomática.	37
Imagen 15: Enmascaramiento de las nubes en el software PCI Geomática.	38
Imagen 16: Normalización de datos en el software PCI Geomática.	38
Imagen 17: hipotética dispersión estadística de la media interanual y la variancia dinámica de un índice de vegetación del paisaje agrícola.	39
Imagen 18: Recorte del NDVI para febrero desde el año 2000 hasta el 2015.	43
Imagen 19: Recorte del NDVI para octubre desde el año 2000 hasta el 2015	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Áreas estratégicas del IGAC.....	15
Tabla 2: Grupos internos de trabajo en la subdirección del CIAF.	15
Tabla 3: Municipios y departamentos de la zona de estudio.	16
Tabla 4: Descripción y aplicación en el proyecto de los tipos de resoluciones.	21
Tabla 5: Fases desarrolladas en la metodología.	28
Tabla 6: Métodos de cálculo para índices de vegetación	30
Tabla 7: Tipos de casos evidenciados en los valores de las imágenes MODIS. ...	39
Tabla 8: Especificación de las horas asistidas por el pasante en la entidad.....	40
Tabla 9: Actividades y productos a realizar por el pasante.....	42

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1: Metodología propuesta para el desarrollo de investigación.....	28
Diagrama 2: Proceso para la obtención de imágenes satelitales.....	33
Diagrama 3: metodología para el pos procesamiento de las imágenes MODIS	36

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Porcentaje de área que ocupan los biomas presentes en el complejo de paramos Guantiva – La Rusia.....	44
Gráfica 2: Comportamiento de los valores medios de NDVI para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.	45
Gráfica 3: Comportamiento de la desviación estándar de NDVI para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.....	47
Gráfica 4: Dispersogramas de los biomas para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.	47
Gráfica 5: Comportamiento de los valores medios de NDVI para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.	49
Gráfica 6: Comportamiento de la desviación estándar de NDVI para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.	50
Gráfica 7: Dispersogramas de los biomas para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.	50

LISTA DE ABREVIATURAS

CIAF	Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica.
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
ICDE	Infraestructura de datos espaciales.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
GIT	Grupo Interno de Trabajo.
ICA	Índice de Calidad Ambiental.
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
MODIS	Espectro Radiómetro de Imágenes de Media Resolución.
ha	Hectáreas
VIS / IV	Índices de Vegetación
SFF	Santuario de Fauna y Flora
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Marcador
WGS 84	The World Geodetic System.
m	Metros
et al	Expresión latina que significa “y otros”
ND	Niveles Digitales
INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería
CN	Constitución Nacional
Art	Artículo
LP DAAC	Procesos Land Center de Archivos Activos Distribuidos
SIGOT	Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial

RESUMEN

El procesamiento de imágenes satelitales para determinar zonas con mayor estabilidad ambiental mediante índices espectrales, permite actualizar la información cartográfica de la zona de estudio, ya que a futuro se podrá utilizar esta cartografía para múltiples investigaciones relacionados con la protección, recuperación y conservación de biomas. Por lo anterior, junto con el grupo de Percepción Remota del CIAF, se realizará el procesamiento de imágenes satelitales para posteriormente aplicar una técnica basada en el método de análisis de sistemas dinámicos denominada “*análisis de varianza media*”, donde se analizan las condiciones de las coberturas vegetales mediante los datos estadísticos arrojados por el índice espectral para determinar los biomas con mayor estabilidad ambiental del complejo de páramos Guantiva la Rusia, así mismo, este documento ilustra el enfoque de estudio hacia la salud ecosistémica del complejo de páramos bajo el análisis y modelamiento espacial de los índices espectrales.

Palabras clave: *Estabilidad ambiental, índices espectrales, imágenes satelitales, salud ecosistémica, biomas.*

ABSTRACT

Satellite image processing, to determine zones with greater environmental stability by means of spectral indexes, allows updating the cartographic information of the study area. In the future this cartography can be used for multiple investigations related to the protection, recovery and conservation of biomes. Therefore, along with the CIAF Remote Sensing Group, the satellite image processing will be carried out to subsequently apply a methodology based on dynamic systems analysis methodology. <this methodology is known as "mean-variance analysis", where the conditions of the Vegetation coverage are analyzed by means of the statistical data provided by the spectral index to determine those biomes with greater environmental stability of the “Guantiva la Rusia” paramo complex. This document also illustrates the study approach towards the ecosystem health of the paramo complex under analysis and the modeling of spectral indexes.

Key words: *Environmental stability, spectral indexes, satellite images, ecosystem health, biomes.*

1. CAPITULO I - PROYECTO

1.1. Introducción

La región denominada Corredor de páramos Guantiva – La Rusia, ubicada en los departamentos de Santander y Boyacá, se destaca por contener la franja más extensa y continua de bosques de roble de todo el país, con un área aproximada de 171.293 ha, de las cuales sólo 12.375 ha hacen parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas [1], es por ello que esta zona de estudio es considerada por la fundación natura como “un área prioritaria para la conservación” [2], así mismo, el reconocido botánico José Cuatrecasas Arumí (1958) en sus estudios destacó la importancia de los sistemas de páramos de la cordillera oriental como áreas de especiación de frailejones.

Por lo anterior y teniendo en cuenta que en la actualidad la población se concentra principalmente en la zona rural (con porcentajes que oscilan entre 65 y 89% aproximadamente, con excepción de Duitama y Santa Rosa de Viterbo [3]), se considera importante analizar la estabilidad ambiental del tipo de bioma que presenta este complejo de páramos, dado que la población campesina basa su sustento en la agricultura, ganadería, tala de especies de importancia comercial y demanda endoenergética [4]. Sin embargo, la determinación de estas zonas tiene un nivel de complejidad muy alto, debido a que intervienen otros factores como la subjetividad de la persona al reconocer la información en campo, por lo anterior y con el fin de tener una mayor amplitud de los datos, estos tipos de caracterización se realizan en la actualidad con imágenes satelitales de sensores remotos.

Los índices de vegetación (VIS) se pueden derivar de las propiedades espectrales de las imágenes satelitales, en este estudio se realizaron teniendo en cuenta un método de análisis de sistemas dinámicos llamado “análisis de varianza media”, el cual se puede utilizar para describir y cuantificar los regímenes dinámicos de la vegetación en respuesta de la perturbación que haya sufrido, utilizando características de resiliencia ecológica, amplitud y la maleabilidad, desde una perspectiva de detección de cambios a través de una serie de tiempo [5]. Para realizar este método, se utilizó una serie temporal de imágenes MODIS desde el año 2000 hasta el año 2016 para medir la respuesta en el tiempo de los tipos de comunidades vegetales presentes en el bioma de la zona rural del complejo de páramos Guantiva – La Rusia, los cuales son intervenidos por condiciones climáticas (épocas de niño y niña) y por actividades antrópicas.

En las treinta y cuatro imágenes MODIS estudiadas (17 del mes de febrero y 17 del mes de octubre), se encontró que todo el paisaje había disminuido su estabilidad ambiental en la cubierta vegetal de los cuatro tipos de biomas presentes, además de evidenciar mediante las dos temporadas climáticas estudiadas (seca, febrero y de lluvias, octubre), que el complejo de páramos Guantiva – La Rusia es susceptible a los cambios climáticos, puesto que las condiciones de los biomas varían respecto a las temporadas del año. Sin embargo, el orobioma con una mayor tendencia de estabilidad ambiental y resiliencia a estas condiciones es el de selva subandina de la cordillera oriental, ya que este se encuentra en condiciones de cobertura vegetal altas y donde la presencia de otras coberturas también lo son¹.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar una metodología basada en índices espectrales para la determinación de zonas con mayor estabilidad ambiental en el complejo de páramos Guantiva la Rusia.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar los índices espectrales e imágenes de sensores remotos más pertinentes para la identificación de zonas de estabilidad en el complejo de páramos.
- Identificar las zonas con mayor estabilidad ambiental del complejo de páramos mediante el análisis multitemporal del índice espectral determinado.
- Consolidar los resultados obtenidos en una capa de estabilidad ambiental para la zona de estudio obtenida a partir de imágenes satelitales.

¹ La selección del orobioma de selva subandina de la cordillera oriental se realizó con base a la metodología de clasificación del autor Robert Washington en el artículo *“Quantification of the ecological resilience of dryland using digital remote sensing”*, explicada detalladamente en el numeral 3.1.8 del presente documento.

2. CAPÍTULO II - MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco contextual

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se encuentra ubicado en la parte nororiental de la localidad de Teusaquillo, limitando con la Avenida Carrera Treinta, la Universidad Nacional y el Servicio Geológico Colombiano (SGC). En la imagen 1 se resalta de color rojo el polígono del área que ocupa el Instituto, sin embargo, se puede ver que al sur de ésta, se encuentra resaltado de color blanco el edificio CIAF, donde finalmente se realizó la pasantía.

Imagen 1: Localización del instituto geográfico Agustín Codazzi.



Fuente: GoogleEarh.

Esta entidad es la encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia, así mismo, dentro de sus subdirecciones y grupos internos de trabajo se realizan otras labores como la elaboración del catastro nacional, el inventario de inmuebles y el de las características de los suelos, así como adelantar investigaciones geográficas para el apoyo al desarrollo territorial y coordinar la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) [1]. Por esta razón, el instituto cuenta con varias subdirecciones que se especializan en uno de los múltiples productos que ejecuta la institución, formando así cuatro áreas estratégicas (ver tabla 1).

Tabla 1: Áreas estratégicas del IGAC.

ÁREAS	FUNCIONES
Subdirección de agrología	Realizar estudios y proyectos en agrología, además, ésta subdirección cuenta con el museo y laboratorio de suelos.
Subdirección de geografía y cartografía	Producir la cartografía digital, mapas turísticos, geodesia y estudios relacionados con el ordenamiento territorial Colombiano.
Subdirección de catastro	Produce, documenta y actualiza toda la información relacionada a los predios (avalúos, catastros, entre otras).
CIAF	Contribuye a partir de la interacción de sus grupos temáticos relacionados con la ciencia Geomática, a generar, actualizar, integrar, difundir, aplicar y compartir los resultados de sus proyectos, mediante la transferencia de conocimientos, la asesoría y consultoría y la cooperación técnica.

Fuente: Página Web IGAC [6].

Dentro del CIAF se encuentran cuatro GIT llamados “grupos temáticos”, los cuales interactúan entre sí para poder desarrollar proyectos de investigación relacionados con el área de conocimiento de la Geomática (ver tabla 2), entre éstos se encuentra el grupo de percepción remota (PR) donde se realizó la práctica profesional. Este grupo se encuentra coordinado por el ingeniero agrónomo Pedro Karin Serrato Álvarez, quien supervisó las labores encaminadas a estudios multitemporales mediante imágenes aéreas y satelitales, así como la interpretación de estas mediante el uso de software de información geográfica.

Tabla 2: Grupos internos de trabajo en la subdirección del CIAF.

GIT	ABREVIACIÓN	DESCRIPCIÓN
Grupo gestión del conocimiento.	GC	Genera, actualiza, integra, difunde, aplica y comparte los resultados de la cooperación con actores estratégicos; la planificación en temas de investigación, desarrollo e innovación en temáticas geoespaciales.
Grupo de percepción remota.	PR	Fomenta en el ámbito nacional el uso de las imágenes provenientes de sensores remotos para el estudio de los recursos naturales y la toma de decisiones en el marco de la planificación territorial, mediante la investigación, generación de propuestas metodológicas, capacitación, transferencia de tecnologías y la prestación de asesorías especializadas.

GIT	ABREVIACIÓN	DESCRIPCIÓN
Grupo de sistemas de información geográfica.	SIG	El grupo SIG procura potenciar la investigación y la aplicación de tecnologías SIG, de forma tal que se logre la vinculación adecuada, efectiva y creciente entre la ciencia, la tecnología y las necesidades del país.
Grupo de infraestructura de datos espaciales.	IDE	Busca Investigar, desarrollar y transferir tecnologías que faciliten la creación de esquemas de gestión de información geográfica que impulsen y consoliden las Infraestructuras de Datos Espaciales como estrategias para optimizar la producción, acceso y uso de la información geográfica.

Fuente: Página web IGAC [6].

2.2. Marco teórico

2.2.1. Área de estudio – Guantiva La Rusia.

El complejo de páramos Guantiva - la Rusia se ubica en el flanco occidental de la cordillera Oriental entre los 2.700 y 4.280 msnm [4]. Forma parte de un corredor extenso de páramos y bosques andinos conocidos como el corredor Guantiva – La Rusia, que se extiende en dirección nororiente desde el Santuario de Fauna y Flora (SFF) de Iguaque (Villa de Leyva, Boyacá) hasta las estribaciones del cañón del río Chicamocha (Onzaga, Santander) [3].

Dentro del área de estudio se cuenta con veintiún (21) municipios los cuales pertenecen a los límites que contiene el Complejo de páramos Guantiva - la Rusia, ubicada entre los Departamentos de Santander y Boyacá, tal y como lo ilustra la tabla 3.

Tabla 3: Municipios y departamentos de la zona de estudio.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIOS
Boyacá	Belén, Cerinza, Duitama, Floresta, Nobsa, Paipa, Paz de Río, Santa rosa de Viterbo, Sativanorte, Sativasur, Soatá, Sotaquirá, Susacón, Tipacoque y Tutazá [7].
Santander	Charalá, Coromoro, Encino, Mogotes, Onzaga y San Joaquín [8].

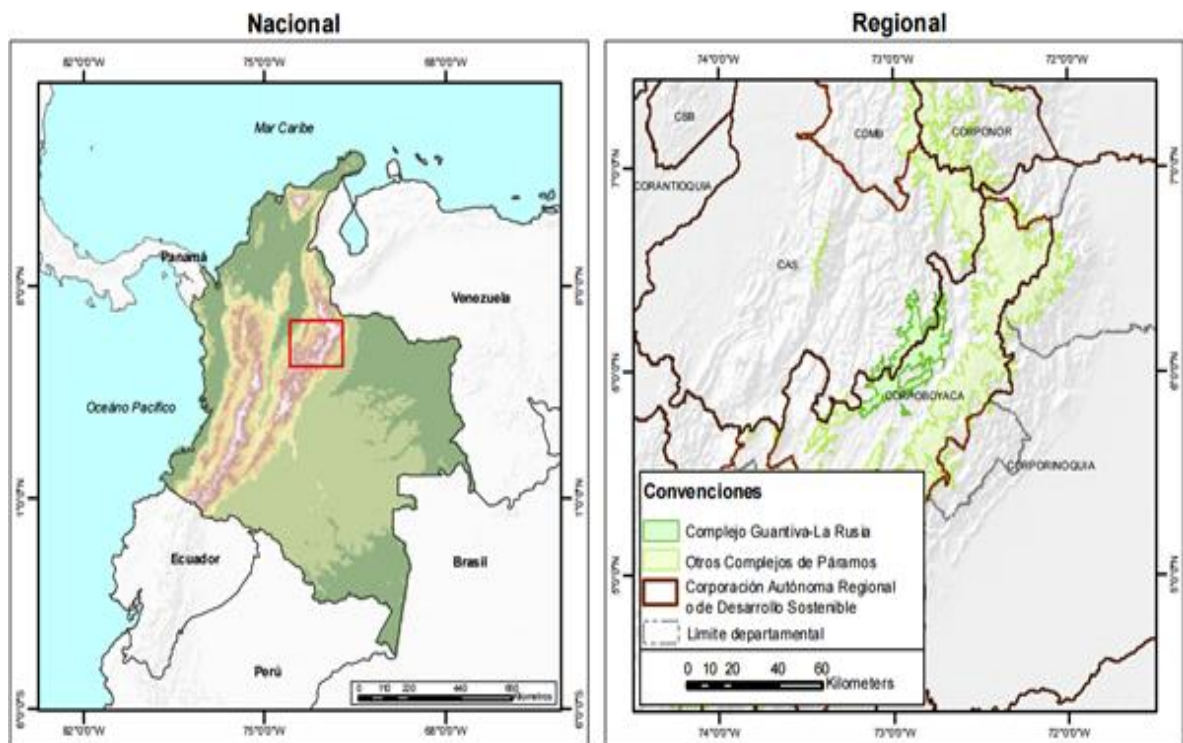
Fuente: Alcaldía de Paipa y Corporación autónoma regional de Santander.

Desde la parte hidrográfica Guantiva - la Rusia es caracterizada como una zona con alto recurso hídrico por la gran cantidad de ríos que corren sobre ella, entre los cuáles se destacan los ríos Chicamocha, Ture, Pienta, Susa, Onzaga, Fonce,

Mogoticos, Guaré, Yama, Táquiza, entre otros, adicionalmente, éste complejo de páramos posee lagunas como Sochagota, Negra, El Cazadero, Grande y otras [3].

Así mismo, la imagen 2 ilustra la ubicación geográfica de la zona de estudio respecto al país, permitiendo ver la extensión de este complejo de páramos.

Imagen 2: Ubicación de la zona de estudio del proyecto.

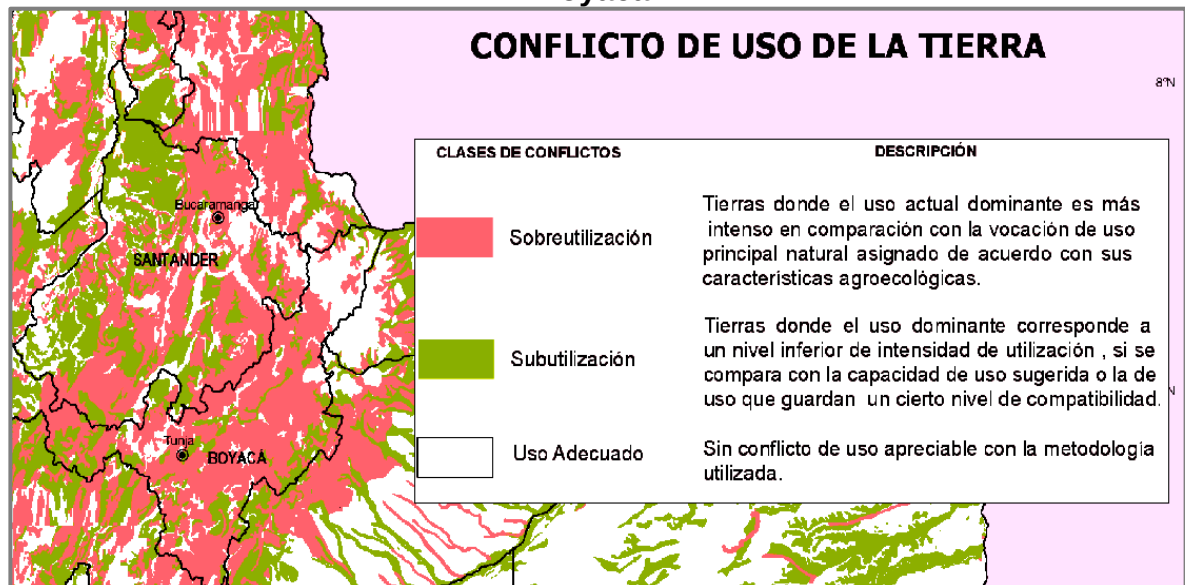


Fuente: Complejo de páramos Guantiva - La Rusia. Distrito Páramos de Boyacá sector cordillera oriental CE-BY-GLR [9].

En relación al conflicto de uso de las tierras en Colombia, se puede evidenciar mediante la imagen 3 que el complejo de páramos Guantiva –La Rusia presenta los tres tipos de conflictos que estudia el SIGOT (Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial) en los mapas en línea de la página oficial, sin embargo, se puede observar que la mayor cantidad de área de los departamentos de Santander y Boyacá corresponden a una sobreutilización de las tierras, donde el uso actual dominante es más intenso en comparación con la vocación de uso principal natural asignado a estas áreas, de acuerdo a sus características agroecológicas. Lo cual permite que este complejo tenga menores alteraciones a nivel de coberturas, ya que en estas áreas de

conflicto no se permite el acceso a la población, sino por el contrario, solo acceden ciertas fuerzas armadas.

Imagen 3: Conflicto de uso de la tierra en los departamentos de Santander y Boyacá.



Fuente: Página oficial del SIGOT [10].

2.2.2. Generalidades de las imágenes satelitales a ser usadas en el proyecto.

La definición de imagen satelital que brinda la página Web teleted dice que “... es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste [10]”, posteriormente estos resultados se transmiten a estaciones terrenas para su visualización, procesamiento y análisis. Esta información digital permite identificar la distribución geográfica de patrones ambientales sobre imágenes multiespectrales, que son procesadas por un equipo automático a partir de algoritmos especiales [11].

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizarán imágenes satelitales MODIS, que se caracterizan por tener una resolución radiométrica media-baja, pero con una alta eficiencia en cubrimiento satelital, ya que con Terra-MODIS (lanzada el 18 de diciembre de 1999) y Aqua-MODIS (lanzada el 4 de mayo de 2002) cubren la superficie total de la tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo una resolución espectral de 36 bandas [12]. MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados y globales capaces de predecir el cambio global que está

sufriendo el planeta Tierra y así tomar decisiones sanas referentes a la protección de nuestro ambiente [13].

Adicionalmente, para los ecosistemas de páramos, las especies vegetales que lo habitan, forman asociaciones cuyo comportamiento espectral se puede determinar por su dominancia y densidad [11], es por ello que resulta importante realizar un buen geo procesamiento de estas imágenes para evitar sesgos de información a causa de espacios vacíos.

2.2.3. Generalidades para la interpretación de la estabilidad ambiental.

Los servicios ecosistémicos se definen como un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales y microorganismos y el medio ambiente inorgánico que interactúan como una unidad funcional [14], por tal motivo, estos ecosistemas realizan contribuciones directas e indirectas de los ecosistemas al bienestar humano, que incluyen tres dimensiones principalmente: valor biofísico o ecológico, sociocultural y valor monetario, por lo cual, la interpretación de la estabilidad ambiental depende intrínsecamente de las condiciones que manifiesten los servicios ecosistémicos, en este caso, en las imágenes satelitales por ejemplo: los espacios vacíos, zonas con mayores coberturas vegetales, formación y alineación entre los cultivos, posicionamiento de predios, colorimetría, entre otros, para luego analizar la variabilidad de estos escenarios en una serie de tiempo y así determinar las condiciones ambientales actuales de la zona de estudio.

La determinación de la estabilidad ambiental mediante imágenes satelitales facilita el proceso de identificación y análisis de las zonas con mayor resiliencia en el complejo de páramos, adicionalmente, permiten tener una comparación de los escenarios para luego relacionar estos resultados con las actividades humanas e industriales que se presentan en los predios analizados.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Índice espectral de vegetación.

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable [15].

2.3.2. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Es un índice que permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial. Se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR ó IR) (Ver imagen 4) [16].

Imagen 4: Fórmula para calcular el NDVI

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Fuente: CONAE [16]

2.3.3. Imagen satelital

Es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación terrena en donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales [17].

Las imágenes satelitales son matrices de celdas llamadas pixel, estos representan un área geográfica determinada que varía en función del tipo de satélite y sensor que la haya tomado. Cada pixel contiene un valor numérico que representa la cantidad de energía reflejada que se obtuvo en esa zona, la diferencia de estos datos son los que permiten que cada celda tome un color diferente, por ejemplo, la imagen 5 parece ser una fotografía de tonos continuos, en realidad está compuesta por una matriz de píxeles y en la imagen 6 se puede observar una gran ampliación de uno de los sectores de la primera imagen (donde se puede distinguir una matriz de 6 por 4 píxeles) [18].

Imagen 5: Recorte de una imagen satelital



Fuente: ScanTerra [18].

Imagen 6: Recorte de una sección de la imagen 3. Matriz de 6x4 pixeles.



Fuente: ScanTerra [18].

2.3.4. Resolución de un sistema sensor.

De acuerdo con algunos autores y especialmente con la definición de Emilio Chuvieco (1990), se entiende por resolución de un sistema sensor como la habilidad de este para registrar y discriminar los valores que no sean captados al realizar un contraste radiométrico. En otras palabras, el concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones; espacial, espectral, radiométrica y temporal, tal y como lo ilustra la tabla 4.

Tabla 4: Descripción y aplicación en el proyecto de los tipos de resoluciones.

TIPO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Resolución espacial	Suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la imagen. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto o m sobre el terreno) y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.	Las imágenes MODIS utilizadas tienen una resolución espacial de 250, lo que equivale a 250 m de terreno.
Resolución espectral	Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En principio, cuantas más bandas incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable	Las imágenes MODIS cuentan con 36 bandas.

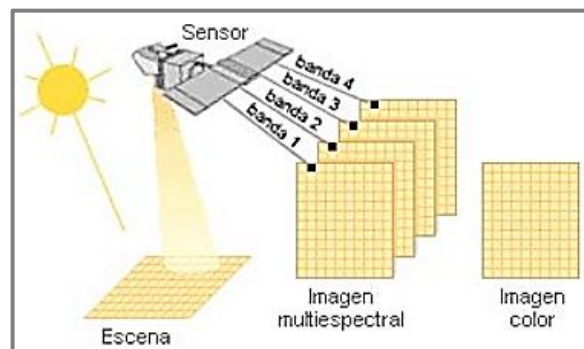
para caracterizar la superficie captada.		
Resolución radiométrica	Describe el número de niveles de gris distintos que registra el sensor. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada píxel, por ello, si la precisión radiométrica es mayor, el número de detalles que se podrán captar en la imagen será mayor.	Los satélites de MODIS proveen imágenes de alta resolución radiométrica (12 bits. Valores de 0-4095)
Resolución temporal	La resolución temporal indica el tiempo del paso del satélite sobre la vertical de un punto. Con ello se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona	Como se nombró anteriormente, MODIS tiene dos satélites que cubren el planeta al cabo de dos días.

Fuente: Emilio Chuvieco [20], Modificado: Autora.

2.3.5. Banda espectral

Las bandas espectrales de las imágenes se crean y clasifican dependiendo la energía reflejada y por tanto los rangos de medición con los que capturen los satélites, es decir, la cantidad de datos reflejados por las coberturas vegetales de la tierra, son totalmente diferentes a los manifestados por las coberturas hídricas, ya que, como se evidencia en la imagen 7, los satélites cuentan con más de un sensor, donde cada uno de ellos captura la energía reflejada en un rango diferente del espectro electromagnético, en consecuencia, estos satélites captan distintos valores de energía para el mismo píxel, generando una imagen distinta en el mismo lugar geográfico [18].

Imagen 7: Esquema de adquisición y generación de una imagen.



Fuente: ScanTerra [18].

2.3.6. Espectro radiómetro de imágenes de media resolución.

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento que viaja a bordo de los satélites de Terra (EOS a.m.) y del Aqua

(EOS p.m.). La órbita de Terra alrededor de la tierra viaja del norte al sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el Aqua viaja del sur al norte cruzando el Ecuador por la tarde [12].

Terra-MODIS y Aqua-MODIS cubren la superficie de la tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales. La información captada por el satélite nos ayuda a comprender la dinámica global de la Tierra; el comportamiento en la superficie terrestre, en los océanos y en la atmósfera. MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados y globales capaces de predecir el cambio global que está sufriendo el planeta Tierra y así tomar decisiones sanas referentes a la protección de nuestro ambiente [12].

2.3.7. Biomasa

Según el diccionario de la real academia Española - RAE, la biomasa es la “materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen”, lo que significaría en otras palabras para el proyecto que: la biomasa es la cantidad de materia que existe en un determinado ecosistema, este parámetro forestal puede emplearse para estimar las cantidades potenciales de diversos productos, uno de ellos es la determinación de zonas con mayor estabilidad ambiental, o para comprender el funcionamiento y relaciones del ecosistema forestal con la productividad del sitio, ya que, ésta refleja la distribución del material orgánico y permite evaluar los efectos de una intervención de carácter antrópico [19]. Un método indirecto para estimar estas coberturas es calcular las magnitudes biofísicas de la vegetación por medio de la herramienta de la percepción remota o teledetección, es decir, mediante la interpretación de los índices de vegetación en las imágenes satelitales.

2.3.8. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es continuo ya que se define como el conjunto de todas las longitudes de onda en que se presenta la radiación electromagnética, la cual está dada por ondas que propagan un campo eléctrico y uno magnético en el espacio [20].

Por otro lado, el ingeniero Oscar Rodríguez plantea una definición más aplicada: *“Cualquier tipo de energía radiante se puede identificar en función de su longitud de onda o frecuencia, existe una gama de bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar, la distribución de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se conoce como espectro*

electromagnético, el cual comprende longitudes cortas como rayos gamma o X hasta longitudes kilométricas como las telecomunicaciones” [20].

2.4. Marco Legal

En los siguientes numerales se presenta las normas que acreditan la importancia de este proyecto, en ellas se incluye como parámetro principal la protección de páramos colombianos, entre ellos, el complejo de páramos Guantiva - La Rusia.

Teniendo en cuenta que esta investigación es un aporte para el proyecto *“uso de imágenes de sensores remotos para el levantamiento físico de apoyo a los avalúos ambientales, etapa 2015”*, a continuación, se expone normativa en relación al tema de avalúos, recursos naturales y valoración económica del ambiente.

2.4.1. Normatividad General.

▪ Constitución Política de Colombia de 1991

La norma constitucional de 1991, elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través del siguiente principio fundamental:

- El medio ambiente como patrimonio común.

La CN incorpora este principio al imponer al Estado y a las personas la obligación de proteger las riquezas culturales y naturales (Art. 8), así como el deber de las personas y del ciudadano de proteger los recursos naturales y de velar por la conservación del ambiente (Art. 95). En desarrollo de este principio, en el Art. 58 consagra que: *“la propiedad es una función social que implica obligaciones y, como tal, le es inherente una función ecológica”*; continúa su desarrollo al determinar en el Artículo 63 que: *“Los bienes de uso público, los parques naturales, las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la Ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables” [21].*

▪ Ley 99 de 1993

“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA y se dictan otras disposiciones” [22]. Entre los artículos aplicables, se encuentran:

- Artículo 1: Principios Generales Ambientales.

En este artículo se establecen varios numerales que aplican en la investigación, por ejemplo, el numeral 2 dice que *“la biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible”*. Así mismo los numerales 7 y 8 expresan la importancia de las ciencias ambientales para proteger el medio ambiente, ya que según el numeral 7 *“el estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables”* y finalmente el numeral 8 deja claro que *“el paisaje por ser patrimonio común deberá ser protegido”*.

Por otro lado, este artículo deja en claro la importancia de los estudios de impacto ambiental en el numeral 11, puesto que éste indica que *“serán el instrumento básico para la toma de decisiones respecto a la construcción de obras y actividades que afecten significativamente el medio ambiente natural o artificial”*, lo cual es de vital importancia para el objetivo y alcance que pretende lograr esta investigación.

- Artículo 105: De las Funciones de INGEOMINAS en Materia Ambiental.

En este artículo se destacan las principales funciones que tiene el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química – INGEOMINAS, una de ellas es *“complementar y apoyar la labor del IDEAM en las investigaciones y estudios del medio ambiente físico que tengan por objeto conocer la tierra, su evolución, su dinámica, sus componentes y recursos, el agua subterránea, la exploración y aprovechamiento de los recursos del subsuelo y la evaluación de los riesgos e impactos geológicos y de obras de infraestructura”*, por tanto este artículo aplica, ya que con la determinación de zonas con mayor estabilidad ambiental, se dará conocimiento del estado y evolución del suelo que conforma el complejo de páramos Guantiva – La Rusia.

▪ Decreto 208 de 2004

“Por el cual se modifica la estructura del INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI – IGAC y se dictan otras disposiciones” [23]. El artículo aplicable es:

- Artículo 10: Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica, CIAF.

Establece las funciones del centro de investigación del IGAC, el CIAF, dentro de las que se encuentra: *“proponer y ejecutar programas y proyectos de cooperación técnica o de crédito y convenios para participar en asesorías, consultorías o prestación de servicios que el Instituto deba realizar a nivel nacional o internacional, en el uso y aplicación de la percepción remota, los sistemas de información geográfica y tecnologías afines para la gestión de información geográfica y cartográfica, agrológica y catastral”*.

2.4.2. Normatividad relacionada con el ordenamiento territorial.

- **Ley 388 de 1997**

Esta ley modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991, además se dictan otras disposiciones como la creación de la ley orgánica de ordenamiento territorial municipal y distrital.

- **Decreto 1420 de 1998**

Por el cual se reglamentan parcialmente artículos de las Leyes 9 de 1989 y 388 de 1997, así como de los Decretos - ley 2150 de 1995 y 151 de 1998, que hacen referencia al tema de avalúos. Este decreto hace parte de los decretos reglamentarios del IGAC, ya que habla sobre las normas, procedimientos, parámetros y criterios para la elaboración de los avalúos por los cuales se determinará el valor comercial de los bienes inmuebles.

- **Resolución IGAC 620 del 2008**

Por la cual se establecen los procedimientos para los avalúos ordenados dentro del marco de la Ley 388 de 1997.

2.4.3. Normatividad relacionada a la protección de biomas.

- **Decreto Ley 2811 de 1974**

Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

- **Resolución 1478 del 2003**

Por la cual se establecen las metodologías de valoración de costos económicos del deterioro y de la conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.

- **Decreto 0953 del 2013**

Por el cual se reglamenta el Artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el Artículo 210 de la Ley 1450 de 2011, con el fin de promover la conservación y recuperación de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y la financiación de los esquemas de pago por servicios ambientales.

- **Ley 1450 del 2011**

Por la cual se expide el plan nacional de desarrollo 2010-2014, el artículo aplicable es:

- Artículo 202: Delimitación de Ecosistemas de Páramos y Humedales.

En este artículo y sus párrafos se explica que deberán ser delimitados a escala 1:25.000 con base en estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales adoptados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial o quien haga sus veces.

- **Ley 629 del 2000**

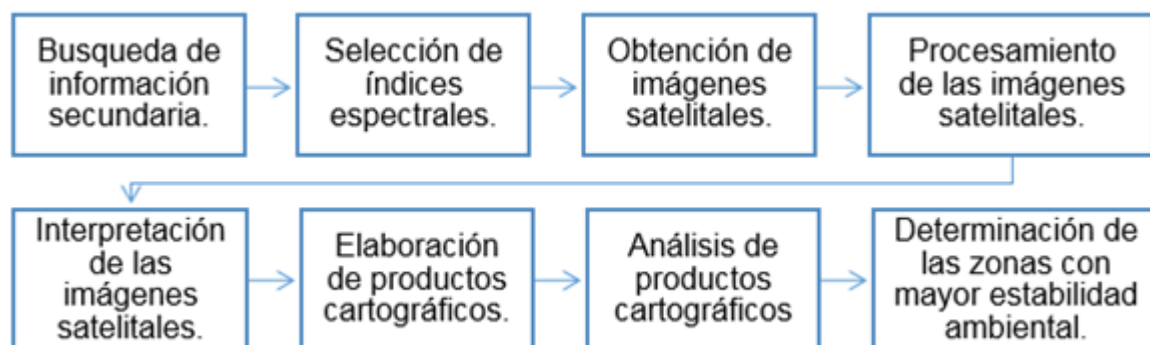
Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kioto el 11 de diciembre de 1997.

3. CAPÍTULO III - DESARROLLO DE LA PASANTÍA

3.1. Diseño metodológico

Las metodologías para el análisis de estabilidad ambiental varían según el recurso o servicio a valorar y la importancia perceptible de este [24]; aun así, es fundamental conocer la existencia y distribución de los servicios ambientales para su valoración. Por lo anterior, en el diagrama 1 se ilustra la metodología a realizar.

Diagrama 1: Metodología propuesta para el desarrollo de investigación.



Fuente: Autora.

Considerando la magnitud de la investigación, la metodología planteada anteriormente fue realizada en dos fases (Ver tabla 4) con el fin de facilitar el manejo de información y llevar un orden consecutivo entre los ítems explicados a continuación.

Tabla 5: Fases desarrolladas en la metodología.

FASE	NUMERALES DE LA METODOLOGÍA CONTENIDOS EN LA FASE
Fase I: Obtención y procesamiento de recursos.	3.1.1. Búsqueda de información secundaria. 3.1.2. Selección de índices espectrales. 3.1.3. Obtención de imágenes satelitales. 3.1.4. Procesamiento de las imágenes satelitales.
Fase II: Interpretación y análisis de los productos.	3.1.5. Interpretación de las imágenes satelitales. 3.1.6 Elaboración de productos cartográficos. 3.1.7 Análisis de productos cartográficos. 3.1.8. Determinación de las zonas con mayor estabilidad ambiental.

Fuente: Autora.

3.1.1. Búsqueda de información secundaria

La búsqueda de información secundaria se efectuó durante las 16 semanas de investigación para la ejecución del proyecto, además se realizó mediante la indagación de artículos relacionados con la determinación de zonas específicas

mediante índices espectrales, entre éstas bases de datos se encuentran ScienceDirect, Scopus, ProQuest, etc. Por otro lado y teniendo en cuenta que el objetivo final de este documento es determinar con datos amplios los biomas con mayor estabilidad ambiental, para analizar los resultados estadísticos del NDVI se utilizó la metodología propuesta en la investigación titulada *“la cuantificación de la resistencia ecológica de zonas áridas uso de digital teledetección”* [5].

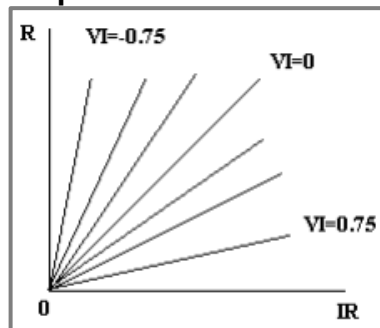
3.1.2. Selección de índices espectrales

Teniendo en cuenta la clasificación de índices espectrales de Beatriz Elena Álzate en Introducción al procesamiento de imágenes digitales [25], los índices de vegetación se dividen en tres grupos:

- **Índices basados en la pendiente:**

Son combinaciones aritméticas simples que se enfocan en la respuesta espectral de la vegetación de las porciones del rojo y del infrarrojo del espectro electromagnético. Son llamados así porque cualquier valor particular del índice puede ser producido por un conjunto de valores de reflectancia de las bandas del rojo y del infrarrojo de una imagen. Estos valores, usando un modo bi-espectral (el eje X es el infrarrojo y el Y el rojo), forman una línea que emana del origen tal como se muestra en la imagen 8 [26].

Imagen 8: Espectro del índice de vegetación.



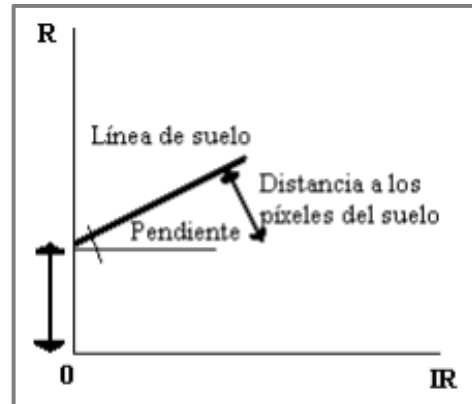
Fuente: Universidad de Piura [26]

- **Índices basados en la distancia**

Miden el grado de vegetación presente a través de la diferencia de cualquier reflectancia de píxel, con la reflectancia del suelo desnudo. En la imagen 9 se muestra un gráfico estadístico conocido como “plot bi-espectral”, en donde el eje X es el infrarrojo y el Y el rojo, además se analiza desde la posición de los píxeles de suelo desnudo de diversos niveles de humedad de una imagen, que tiende a formar una línea (línea de suelo). En la medida en que la cobertura de vegetación se incrementa, este suelo de fondo llegará a ser enmascarado con los píxeles de

vegetación, que mostrarán una tendencia al incremento de la distancia perpendicular desde la línea de suelo [26].

Imagen 9: Principio de cálculo de los índices basados en la distancia



Fuente: Universidad de Piura [26]

- **Índices basados en transformaciones ortogonales**

Es la más conocida de este grupo, ya que consiste en la transformación de bandas espectrales disponibles para formar un nuevo conjunto de bandas no correlacionadas, dentro de las cuales una imagen de índices de vegetación verde puede ser definida.

Finalmente, la tabla 6 ilustra tres de los índices más utilizados en las clasificaciones nombradas anteriormente.

Tabla 6: Métodos de cálculo para índices de vegetación

ÍNDICES BASADOS EN LA PENDIENTE		
NOMBRE	FÓRMULA	CARACTERÍSTICA
De diferencia normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Minimiza efectos topográficos, la escala va de -1 a 1, con el valor cero representando el aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación.
Transformado (TVI)	$TVI = \sqrt{\frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}} + 0.5$	El valor de 0.5 evita resultados negativos. La raíz cuadrada intenta corregir valores que se aproximan a una distribución de Poisson e introduce una distribución normal. No elimina todos los valores negativos.
Cociente simple (RVI)	$RVI = \frac{(RED)}{(NIR)}$	La reversa de la estándar simple. No es muy eficiente porque su eficiencia es del 60 %.

ÍNDICES BASADOS EN LA DISTANCIA		
NOMBRE	FÓRMULA	CARACTERÍSTICA
De diferencia (DVI)	$DVI = \gamma NIR - RED$ <i>γ: pendiente de línea suelo</i>	Un valor de cero, indica suelo desnudo. Los menores de cero aguas y las mayores vegetaciones.
De suelo ajustado (SAVI)	$TVI = \left(\frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED) + L} \right) * (I + L)$	Incorpora una constante de suelo, la cual se usa con una vegetación baja, intermedia o alta. Considera la influencia de la luz y el suelo oscuro en el índice.
De suelo ajustado (TSAVI)	$TSAVI = \frac{a * (NIR - a) * (RED - b)}{(RED + a) * (NIR - a * b)}$ <i>a: pendiente de línea suelo</i> <i>b: intercepto línea suelo</i>	Considera la pendiente y el intercepto de la línea de suelo. Mucho efecto del suelo de fondo. Tiene varias modificaciones
ÍNDICES BASADOS EN TRANSFORMACIONES ORTOGONALES		
NOMBRE	CARACTERÍSTICA	
Análisis de componente (PCA)	Usada para descubrir la dimensionalidad de datos multivariados removiendo las redundancias (evidente en la Inter Correlación de los valores de píxel de la imagen) En las imágenes la primera componente típicamente representa el fondo del suelo, mientras que la segunda representa la variación en la cobertura vegetal.	
De Misra (MGVI)	La misma filosofía, pero con muchas bandas. No produce el mismo efecto de componente principal, pues los coeficientes pueden ser colocados específicamente.	
De Tasseled Cap (GVI)	Provee coeficientes globales que son usados para darle peso a las bandas originales generando bandas nuevas transformadas. Los pasos negativos GVI en las bandas del visible minimizan el efecto del suelo de fondo, los positivos en el IR enfatizan la señal de la vegetación. Su fórmula es: $GVI = [(-0.24717 TM1) + (-0.16263 TM2) + (-0.40639 TM3) + (0.854558 TM4)]$	

Fuente: Universidad de Piura [26]

Sin embargo, teniendo en cuenta que la bibliografía asegura que los mejores índices para la interpretación de zonas con mayor estabilidad ambiental son los que se encuentran basados en la pendiente, serán estos los que se estudiarán, además, como señala Marcos Abaurrea (2013) en su documento, estos índices *“son combinaciones de las bandas roja visible e infrarroja cercana y se usan extensamente para generar índices de vegetación, además estos indican valores tanto del estado como de la abundancia de la cobertura y biomasa de la vegetación verde”* [27].

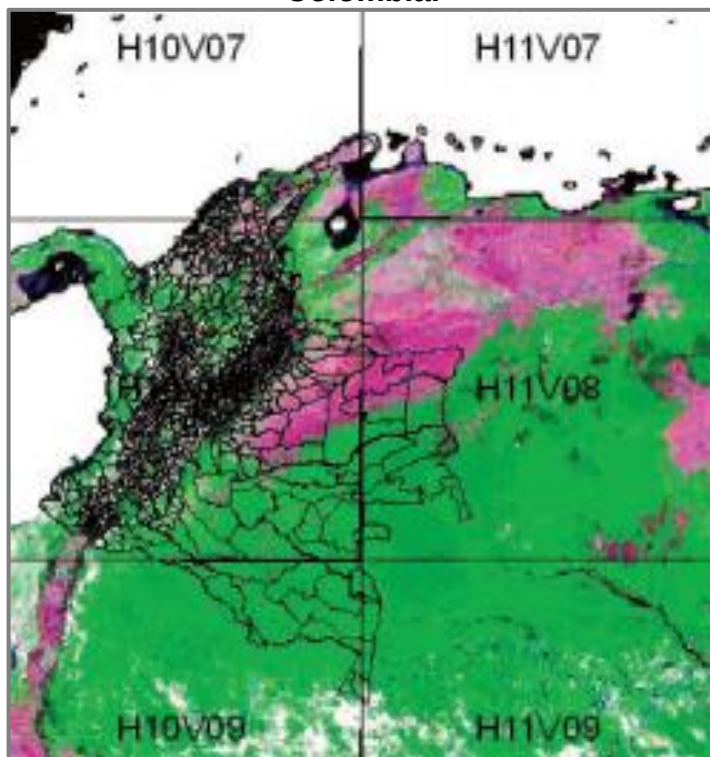
Por lo anterior y con base al objetivo del estudio, se decidió utilizar el índice de diferencia normalizada (NDVI), ya que este es el índice más comúnmente usado porque tiene la habilidad de minimizar los efectos topográficos y a su vez producir una escala de medida lineal. Además, los errores de división por cero son

reducidos en gran medida. Más aún, la escala de medida posee la apreciada propiedad de oscilar de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación. Entonces, los valores negativos representan las superficies sin vegetación [27]. Así mismo y con el análisis bibliográfico realizado, se considera que el índice espectral NDVI es el que mejor adaptabilidad tiene para la determinación de zonas con mayor estabilidad ambiental mediante las imágenes satelitales MODIS, ya que este se encuentra como una capa vinculada a las imágenes MODIS MOD 13Q1 V5, además permite saber el estado de las coberturas vegetales presentes en el complejo de páramos Guantiva – La Rusia.

3.1.3. Obtención de imágenes satelitales

Las imágenes se obtuvieron a partir del cuadrante H10V8 del sistema de referencia MODIS para Colombia (ver imagen 10), ya que esta cubría la zona de estudio, adicionalmente se re proyectaron a UTM utilizando como elipsoide de referencia el WGS84.

Imagen 10: Sistema de referencia MODIS para el área continental de Colombia.



Fuente: Anaya (Revista de teledetección) [28]

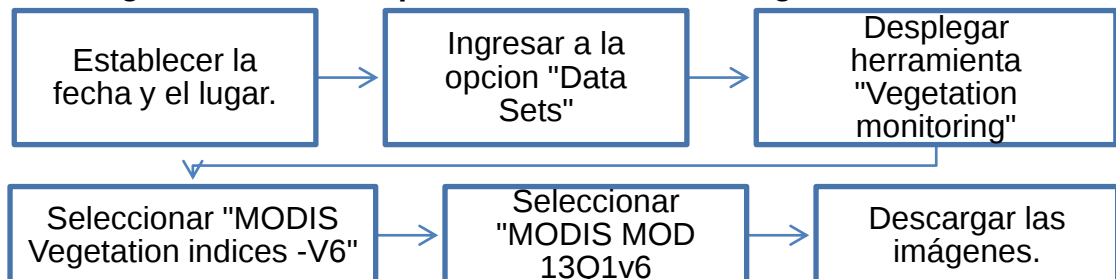
Por otro lado, las imágenes se descargaron de la página web del servicio geológico de los estados unidos o USGS por sus siglas en inglés, de allí primero se creó una cuenta para poder tener acceso a la descarga de imágenes satelitales, luego se seleccionó la zona de estudio tal y como lo ilustra la imagen 10 y finalmente mediante los pasos que se ven en el diagrama 2 se pudo descargar las imágenes satelitales.

Imagen 11: Vista de la zona de estudio desde el USGS.



Fuente: Página oficial del USGS.

Diagrama 2: Proceso para la obtención de imágenes satelitales.



Fuente: Autora.

Las imágenes se descargaron en una serie de tiempo definida entre los años 2000 hasta el 2016, seleccionando dos imágenes anuales, las cuales corresponden a los meses de febrero y octubre, ya que estos permiten determinar el estado de las coberturas en dos temporadas climáticas (seca y húmeda respectivamente), para finalmente completar un total de 34 imágenes, las cuales permitirán tener una serie de tiempo amplia y de este modo medir la respuesta que han tenido los tipos de comunidades vegetales presentes en los biomas del complejo de páramos Guantiva – La Rusia, los cuales son intervenidos por condiciones climáticas (épocas de niño y niña) y antrópicas (deforestación, agricultura, entre otras).

3.1.4. Procesamiento de las imágenes satelitales

Aunque las imágenes MODIS utilizadas en el proyecto (versión quinta (V5)) tienen como funcionalidad recopilar la información recolectada durante 15 días para luego crear una nueva escena ya corregida y procesada, es importante tener claridad de las condiciones que debe tener el producto antes de realizarle una interpretación y análisis, ya que es recomendable realizar las debidas calibraciones para tener una mejor certeza de los datos. Por ello, a continuación, se explicará algunos de los parámetros para la corrección y calibración de las imágenes satelitales.

- **Calibración radiométrica.**

Este proceso permite convertir la información de la imagen original (cruda) de cada pixel de niveles digitales - ND - a niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera, es decir, sin los efectos de la misma, lo que permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera. Adicionalmente, se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra – Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes [29].

- **Corrección atmosférica.**

Este proceso permite la corrección de neblina y/o el enmascaramiento de nubes, por lo tanto, es el más significativo para el estudio, ya que se necesita tener una imagen “verdadera” de la zona estudiada para evitar alteraciones en los datos estadísticos. Como resultado final de este sub-proceso, se obtiene una imagen en valores de reflectancia, que mejora la separabilidad espectral de los objetos (coberturas de la tierra) respecto a la imagen original, mejorando los resultados finales del proceso de clasificación digital [29].

- **Corrección geométrica.**

Este proceso corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas presentes en una imagen, causados por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la toma), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados con la imagen [29].

Cuando se utilizan imágenes satelitales para determinar el estado de vegetación u otras condiciones ambientales, se deben considerar muchos aspectos, ya que, esta parte del proceso es determinante y fundamental, en general, con estas correcciones se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el

valor radiométrico de cada elemento de la escena. Sin embargo y como se nombró al inicio de esta sección, las imágenes satelitales MODIS, realizan estas correcciones y calibraciones en una serie de tiempo de 15 días consecutivos, con el fin de generar productos de alta precisión con resolución espacial de 250 m.

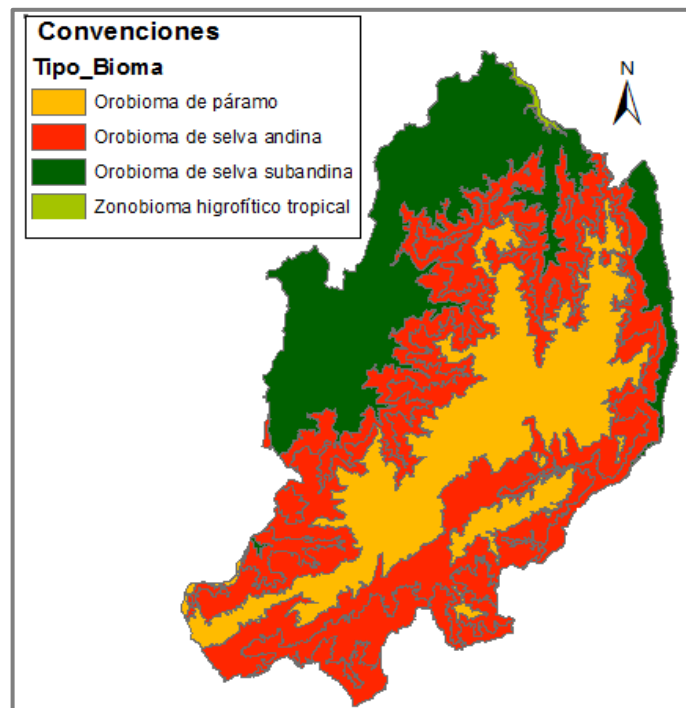
3.1.5. Interpretación de las imágenes satelitales

Una vez descargadas las imágenes satelitales, se procede a interpretar las imágenes hipotéticamente, para analizar mediante las bandas espectrales la salud de los ecosistemas en la serie de tiempo determinada, verificando que la zona de estudio tenga datos relativos y variaciones.

3.1.6. Elaboración de productos cartográficos

En primera instancia se realizará una delimitación de los biomas encontrados para Colombia respecto al complejo de páramos Guantiva - La Rusia (shape otorgado por la entidad para que corresponda a la misma zona de estudio del proyecto “uso de imágenes de sensores remotos para el levantamiento físico de apoyo a los avalúos ambientales, etapa 2015”), esto se realizó mediante la herramienta Clip del software ArcMap para obtener el producto ilustrado en la imagen 12. Luego se procederá a realizar el pos procesamiento de las imágenes, es decir, en esta fase se generan el procesamiento de las 34 imágenes MODIS y así comparar el índice espectral para cada año y luego realizar la extracción de los espacios vegetales naturales para finalmente obtener el área efectiva de las imágenes a ser trabajadas.

Imagen 12: Delimitación de la zona de estudio.



Fuente: Autora.

Con el fin de ejecutar las actividades nombradas anteriormente, se realizó un modelo en el software PCI Geomática (model PCI) para agilizar el pos procesamiento de las imágenes descargadas. Este modelo consistía en cuatro pasos, sin embargo, se realizaron otro tipo de procesamientos antes de correr el modelo (Ver diagrama 3).

Diagrama 3: metodología para el pos procesamiento de las imágenes MODIS



Fuente: Autora.

3.1.6.1. Creación de un layerstake o capa.

La creación de una nueva capa se realizó con el fin de unir las imágenes MODIS con información del NDVI y la capa “pixel reliability” que indica los rangos de valores a los cuales se les aplica un control de calidad, así como lo ilustra la imagen 13. Teniendo en cuenta estas condiciones, el modelo ilustrado en la imagen 15 se realizó únicamente con el valor de cero.

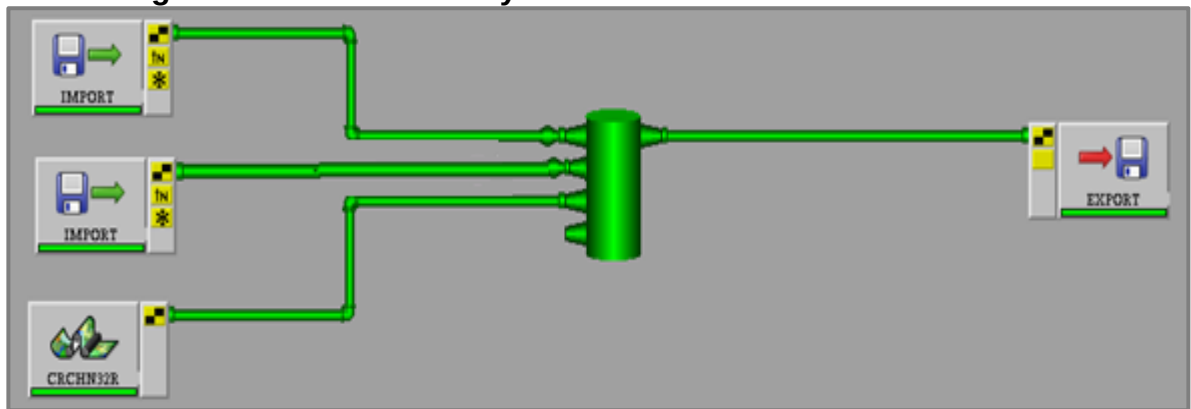
Imagen 13: Condiciones de la capa pixel reliability para las imágenes MODIS MOD13Q1.

Rank Key	Summary QA	Description
-1	Fill/No Data	Not Processed
0	Good Data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but look at other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

Fuente: LP DAAC [30]

La imagen 14 ilustra las herramientas utilizadas para crear la unión entre la capa pixel reliability y las imágenes MODIS con información del NDVI, del mismo modo se puede observar como para la creación de esta nueva capa se insertó un canal (herramienta CRCHN32R) el cual permite que la capa a exportar tenga un nuevo canal en el que se pueda realizar el modelo del numeral 3.1.6.2. “eliminación de nubes”.

Imagen 14: Creación del layerstake en el software PCI Geomática.

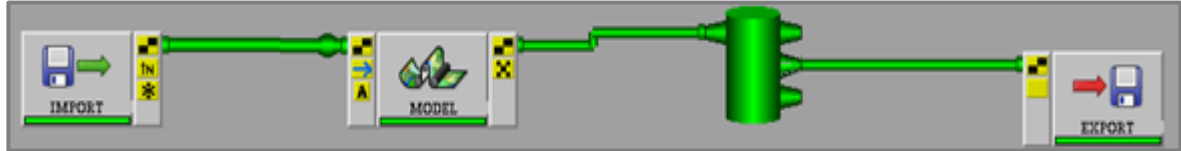


Fuente: Autora.

3.1.6.2. Eliminación de nubes.

Teniendo en cuenta que este modelo era consecutivo, la elaboración de este paso (imagen 14) se realizó importando las imágenes exportadas en el numeral anterior, luego se insertó la herramienta “model” en la cual se indicó la siguiente condición: *“if %1=0 then %3=%2 endif”*, lo que indicaría que si la capa uno (capa pixel reliability) es igual a cero (los valores buenos), entonces a la nueva capa (la creada en el nuevo canal) insértele lo de la capa NDVI.

Imagen 15: Enmascaramiento de las nubes en el software PCI Geomática.



Fuente: Autora.

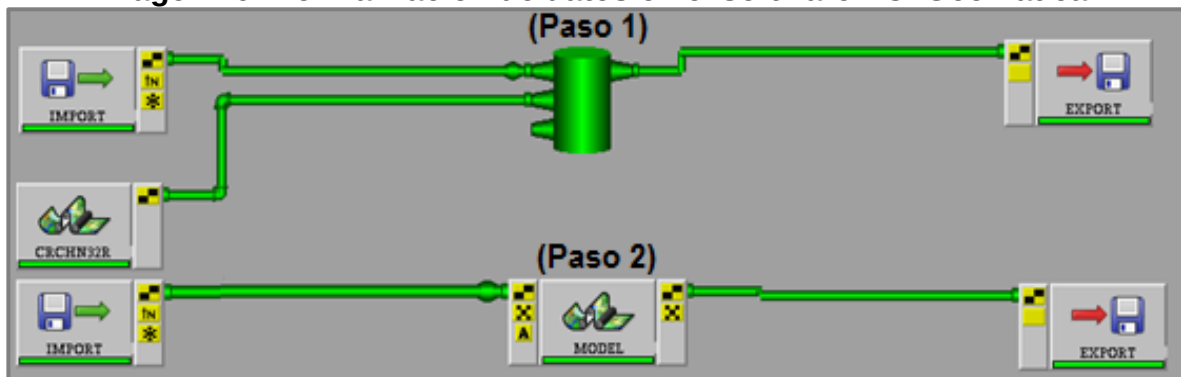
3.1.6.3. Recorte de las imágenes.

El recorte de las imágenes se realizó manualmente, es decir, para cada fecha del año. Esto se realizó en el software PCI Geomática mediante la ruta: *Tools* → *Clipping*, allí se indicó que el recorte se haría con base al clip realizado en el software ArcGIS (imagen 12), ya que este contenía la información de los biomas de Colombia.

3.1.6.4. Normalizar los datos de las imágenes.

Los datos fueron normalizados ya que el NDVI se estudia en un rango de valores de cero a uno, y en los datos de las imágenes MODIS se obtenían valores en cifras de miles, por ello se tuvo que realizar dos pasos; el primero donde se crearía un nuevo canal (dos capas) y el segundo, donde se crearía un modelo con la siguiente condición “ $%2 = \%1 / 10.000$ ”, es decir, que en el nuevo canal se pusiera la información del NDVI dividido en 10.000 (imagen 16).

Imagen 16: Normalización de datos en el software PCI Geomática.



Fuente: Autora.

3.1.6.5. Generar los datos estadísticos.

Al igual que en el numeral 3.1.6.3., este ejercicio se realizó para cada fecha, realizando la siguiente ruta: *Analysis* → *Overlay* → *Statistical* → *Avanzada*, allí se eligió calcular la desviación estándar y la media de los datos, los cuales se iban añadiendo en la tabla de atributos del clip con datos ya normalizados.

3.1.7. Análisis de productos cartográficos

Para realizar un análisis global de los datos obtenidos, se propuso dos etapas; la primera donde se realice una comparación visual para la serie de tiempo estudiada y la segunda, donde se comparen los valores estadísticos (promedio y desviación estándar) para identificar en que zonas o coberturas el índice se encuentra mejor representado. Así mismo se generará un dispersograma estadístico que evidencie el tipo de cobertura en la secuencia de años estudiada, además de analizar la desviación estándar y la media de dichos datos. Por otro lado, se pretende organizar la información por tipo de bioma (orobioma de páramo, selva andina, selva subandina e higrofático tropical o selva húmeda) para luego generar gráficos que relacionen la cantidad de cobertura en relación con la serie de tiempo analizada.

3.1.8. Determinación de las zonas con mayor estabilidad ambiental.

Esta fase se realizó teniendo en cuenta la metodología propuesta en el artículo titulado *“la cuantificación de la resistencia ecológica de zonas áridas uso de digital teledetección”* [5], donde se proponen cuatro casos para determinar las zonas con mayor estabilidad ambiental (ver tabla 7).

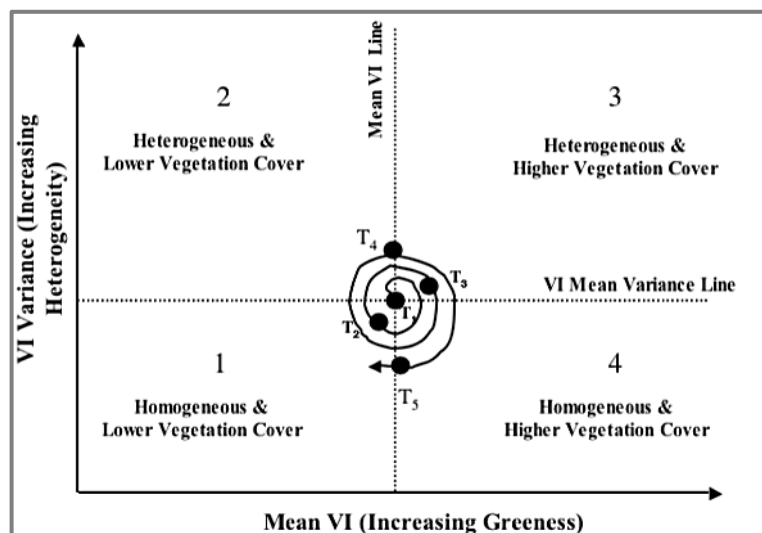
Tabla 7: Tipos de casos evidenciados en los valores de las imágenes MODIS.

TIPO	DESCRIPCIÓN
Caso 1	Los valores de la media y la varianza son bajos, lo que indica que la imagen tiene una baja cobertura vegetal y que se ha mantenido así en el tiempo.
Caso 2	Los valores de la media son bajos pero los de la varianza altos, lo que significa baja cobertura vegetal pero que existen otros tipos de coberturas.
Caso 3	Los valores de la media y la varianza son altos, es decir, que la cobertura de vegetación es alta y la presencia de otras coberturas también lo son.
Caso 4	Los valores de la media son altos y los de la varianza bajos, es decir, es el caso ideal porque existe una alta cobertura vegetal sin ningún otro tipo de coberturas.

Fuente: Robert A. Washington et al. [5]

El análisis multitemporal a emplear consiste en el método anteriormente expuesto, donde se explica que para cada celda de la grilla se obtendrán los valores de media y varianza para el índice espectral estudiado (NDVI), además de evidenciar la tendencia en el comportamiento de estos dependiendo de las condiciones en las que se encuentren los datos estadísticos en el dispersograma ilustrado en la imagen 17, el cual ilustra lo mencionado en la tabla 7.

Imagen 17: hipotética dispersión estadística de la media interanual y la variancia dinámica de un índice de vegetación del paisaje agrícola.



Fuente: Robert A. Washington et al. [5]

3.2. Plan de trabajo

La práctica laboral se realizará en el marco de ejecución del proyecto “uso de imágenes de sensores remotos para para el levantamiento físico de apoyo a los avalúos ambientales, etapa 2015”, que adelanta el ingeniero Nelson Nieto y la bióloga Lina Parada del grupo de percepción remota. En consecuencia, los productos y actividades definidas responden directamente a la estructura temática y plan de trabajo del proyecto.

3.2.1. Tiempo

Para cumplir con los lineamientos que establece la universidad, en el transcurso de los meses de agosto a noviembre, se acuerda una asistencia mínima de veinticinco (25) horas semanales (de lunes a sábado), de acuerdo a la tabla 8.

Tabla 8: Especificación de las horas asistidas por el pasante en la entidad.

MES	SEMANA	FECHAS (días)	HORAS*
Agosto	1	01 al 06	27
	2	8 al 13	27
	3	15 al 20	27
	4	22 al 27	27
	5	29 al 3 de septiembre	27

Septiembre	1	5 al 10	27
	2	12 al 17	27
	3	19 al 24	27
	4	26 al 1 de octubre	27
Octubre	1	3 al 8	27
	2	10 al 15	27
	3	17 al 22	27
	4	24 al 29	27
	5	31 al 5 de Noviembre	27
Noviembre	1	7 al 12	27
	2	14 al 19	27
	3	21 al 26	27
	4	28 al 3 diciembre	21
TOTAL	17	125 días	480

Fuente: Autora.

Las horas serán contadas de lunes a sábado en los siguientes horarios: lunes y jueves de 9am a 4pm, martes y viernes de 11am a 4pm, miércoles de 8am a 4pm y sábados de 8am a 1pm. Sin embargo, el plan de trabajo para el grupo de percepción remota de la subdirección del CIAF, exige un documento en formato de artículo que recapitule la investigación desarrollada durante la pasantía, por tal motivo, desde el 5 hasta el 23 de diciembre se consolidará esta información para realizar el debido entregable.

3.2.2. Lugar de ejecución

Las prácticas se realizarán en su totalidad en la ciudad de Bogotá dentro de las instalaciones del IGAC, específicamente en el edificio del CIAF en la oficina 311A.

3.2.3. Resultados y forma de evaluación de las prácticas

Se acuerda que la evaluación se realice por resultados y productos entregados tanto para el proyecto de investigación como los demás oficios, informes o

estudios que se necesiten del apoyo de percepción remota, por ello la tabla 9 expone:

Tabla 9: Actividades y productos a realizar por el pasante.

ITEM	DESCRIPCIÓN
Proyecto	Determinación de zonas con mayor estabilidad ambiental en el complejo de páramos Guantiva la Rusia mediante índices espectrales.
Actividad	• Generar un cronograma de actividades en formato de seguimiento. • Diseñar un planteamiento de problema específico. • Realizar un estado del arte y marco conceptual del tema propuesto mediante la recopilación bibliográfica. • Definición de tipo y cantidad de información y software a utilizar. • Obtención de imágenes e identificación de técnicas de procesamiento. • Definición de la metodología a desarrollar. • Procesamiento de las imágenes. • Análisis de resultados obtenidos. • Elaboración de conclusiones y recomendaciones. • Elaboración del artículo de difusión para el IGAC. • Ejecución parcial del tema propuesto.
Producto	Entrega de artículo aplicativo al proyecto de investigación trabajado.

Fuente: Autora.

Adicionalmente, la forma de evaluación se realizará semanalmente, teniendo en cuenta los entregables, las actividades realizadas y ejecutadas (ver anexo: comprobante de asistencia).

4. CAPÍTULO IV - RESULTADOS OBTENIDOS

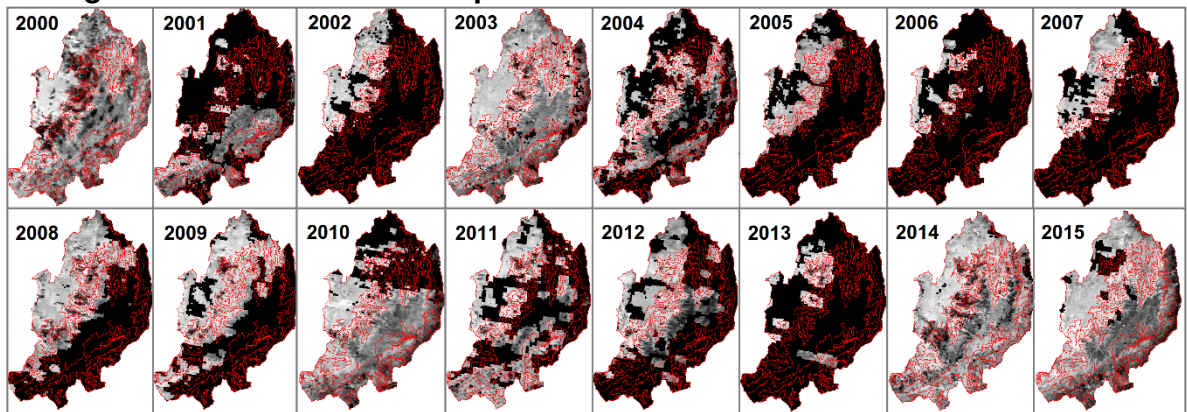
Como se nombró en el numeral 3.1.7. “análisis de productos cartográficos”, la interpretación de estos resultados se realizó a partir de dos etapas.

4.1. Etapa 1: Análisis visual.

La imagen 18 ilustra los datos obtenidos del NDVI a partir de las imágenes satelitales MODIS en la serie de tiempo estudiada, de color rojo se puede evidenciar el área que delimita el complejo de páramos Guantiva – La Rusia y los cuatro tipos de biomas que lo componen (ver imagen 12). Así mismo se puede evidenciar que por la resolución de 250 que tiene sensor MODIS, al enmascarar las imágenes y quitarles la nubosidad, se perdió mucha información, por ejemplo, para los años 2006 y 2013, se tiene menos del 40% de los valores representativos para el NDVI.

Por lo anterior, se puede estimar visualmente que el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental es el que mayor información va a obtener y por tanto se puede concluir hipotéticamente que será el tipo de bioma con mayor resiliencia en el complejo de páramos, teniendo en cuenta que es el que mayor información presenta y por tanto será más amplio su análisis.

Imagen 18: Recorte del NDVI para febrero desde el año 2000 hasta el 2015.

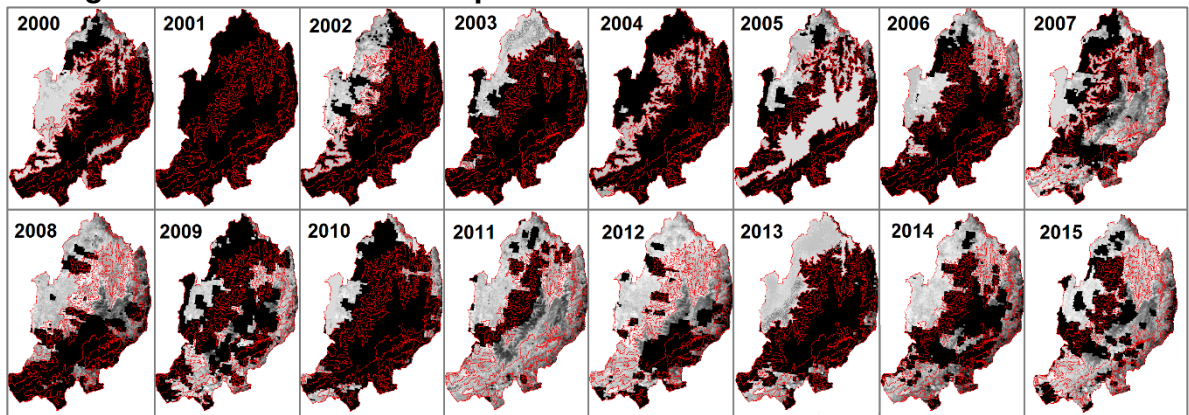


Fuente: Autora.

Del mismo modo, para el mes de octubre se presentaron los mismos inconvenientes a la hora de enmascarar las imágenes MODIS, sin embargo, en esta época fue más notorio ya que para años como el 2001 (ver imagen 19) el fenómeno de la niña tuvo una magnitud muy alta, lo cual provoco mayor asentamiento de las nubes para finalmente impedir que se registraran valores en esa época del año. No obstante, para años como el 2011, donde no se eliminó

mucha información a la hora de extraer la capa de las nubes, se puede concluir hipotéticamente lo relacionado a la imagen 18, es decir, que el bioma con mayor cobertura de datos es el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental, debido a que el área total de este tipo de bioma se ve menos afectada por la corrección atmosférica aplicada a las imágenes, por tanto, se podría inferir que será el de mayor estabilidad ambiental para el segundo semestre de los años estudiados.

Imagen 19: Recorte del NDVI para octubre desde el año 2000 hasta el 2015

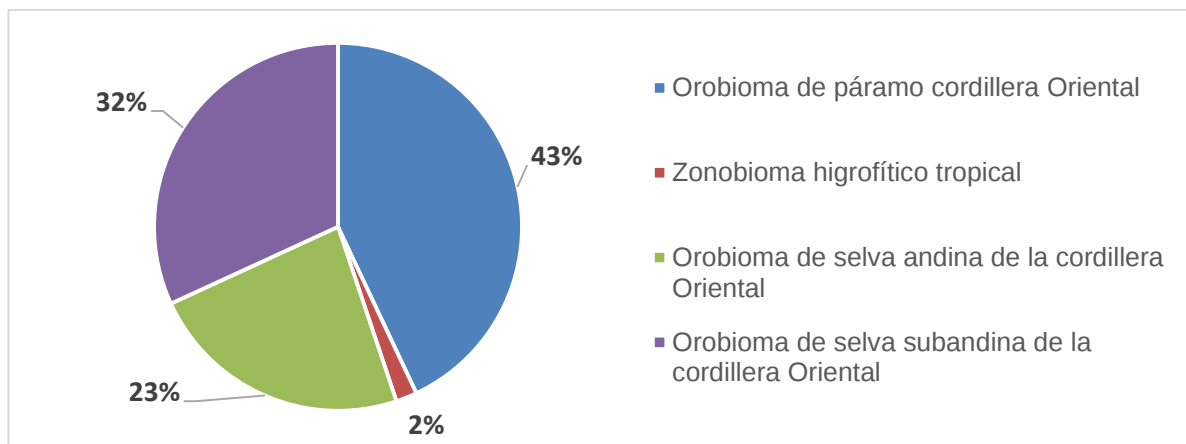


Fuente: Autora.

4.2. Etapa 2: Análisis estadístico.

Teniendo en cuenta la amplitud del complejo de páramo Guantiva- La Rusia en los departamentos de Santander y Boyacá, se decidió analizar las proporciones de terreno que ocupan los cuatro tipos de biomas presentes; Orobioma de páramo de la cordillera oriental, zonobioma higrofítico tropical, orobioma de selva andina de la cordillera oriental y el de selva subandina de la misma cordillera.

Gráfica 1: Porcentaje de área que ocupan los biomas presentes en el complejo de paramos Guantiva – La Rusia.



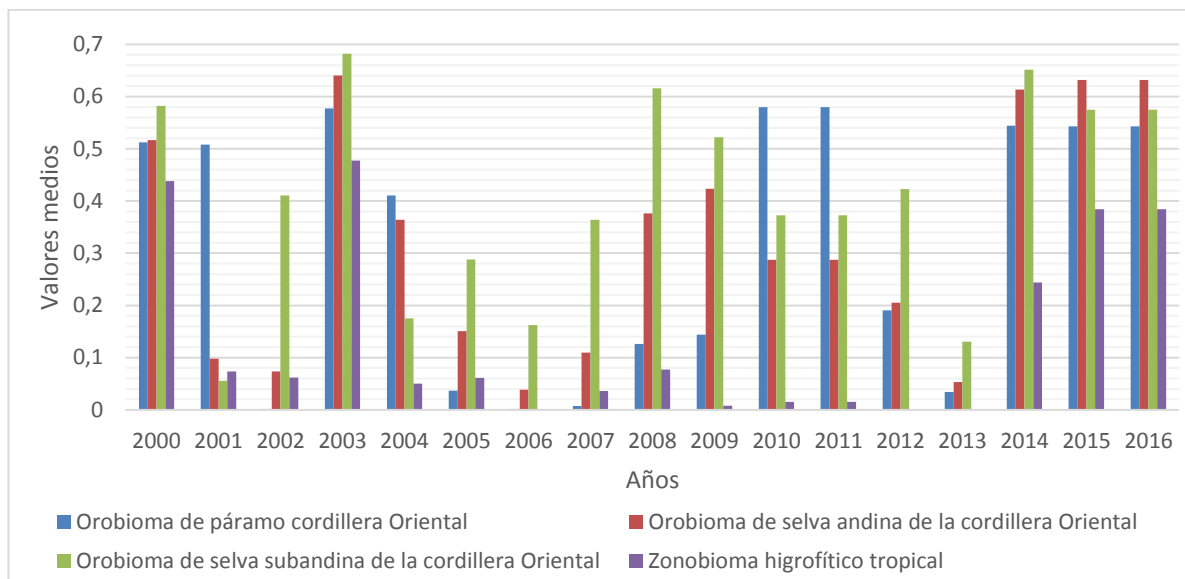
Fuente: Autora.

En la gráfica 1 se puede evidenciar como el orobioma de páramo de la cordillera oriental es el que ocupa una mayor área, sin embargo, no alcanza a ser la mitad del área total (como normalmente se esperaría), por el contrario se encuentra seguido del orobioma de selva andina o micronanófila como también se conoce, ya que éstos se caracterizan por tener zonas altamente boscosas donde las nieblas son frecuentes, las cuales tienden a reducir la evaporación y a incrementar la condensación del vapor que constituye la niebla, es decir, que la relación de estos porcentajes es coherente, ya que ambos tipos de biomas se complementan respecto a los ciclos de vida y actividades climáticas de la zona.

4.2.1. Análisis estadístico para el mes de febrero.

La gráfica 2 ilustra el comportamiento que tiene los valores medios del NDVI en los cuatro biomas estudiados para el mes de febrero, se puede observar como la respuesta del NDVI para el año 2003, fue más alta, alcanzando valores pico de 0.68 (para el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental) y medios de 0.47 (para el zonobioma de higrofitico), esto se debe a que en este año no se presentó ninguna anomalía climática y por tanto los biomas no fueron alterados, sin embargo, se puede observar como en los años 2006 – 2007, si se presenta un descenso en los valores medios registrados, debido a que este último año experimento las secuelas del fenómeno del niño.

Gráfica 2: Comportamiento de los valores medios de NDVI para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.



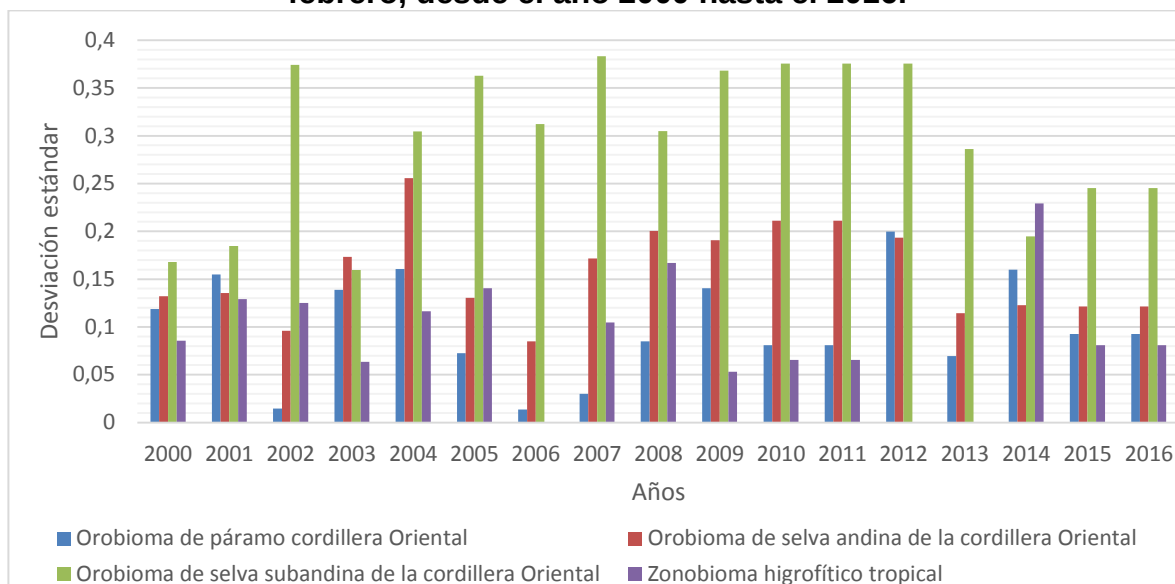
Fuente: Autora.

Así mismo, en la gráfica 2 se puede observar como el bioma más afectado es el de páramos, ya que oscila en un rango de 0.2 a 0.57 debido a que este orobioma es muy sensible a los cambios climáticos y en la serie de tiempo estudiada se manifestaron dos fenómenos de niña (años 2010 y 2016) y un fenómeno del niño (año 2006).

Por otro lado, la gráfica 3 ilustra el comportamiento que tiene la desviación estándar del NDVI en los cuatro biomas estudiados para el mes de febrero, se puede observar de manera general que el comportamiento es bimodal, teniendo valores altos en los registrados del orobioma “selva subandina de la cordillera oriental” y como mínimos el orobioma de páramo, revelando de este modo, que el primero tiene una dispersión de los datos mayor que los demás orobiomas, así mismo, se puede evidenciar que el orobioma de páramos es el que menor dispersión de datos presenta, ya que, aunque presenta valores mínimos en relación a los demás biomas, éste no tiene un comportamiento atípico, por el contrario, mantiene el mismo comportamiento durante los 17 años.

Del mismo modo, la gráfica 3 permite ilustrar la relación inversa que tiene la desviación estándar y los valores medios del NDVI para los cuatro biomas estudiados, ya que, para las fechas en las que se registra los valores medios más altos, también se registra la menor dispersión de datos (desviación estándar), es decir, para los años que presentan altos valores medios; 2000, 2003 y del 2014 al 2016, (ver gráfica 2), en la gráfica tres son los que menores valores de dispersión de datos manifiestan.

Gráfica 3: Comportamiento de la desviación estándar de NDVI para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.

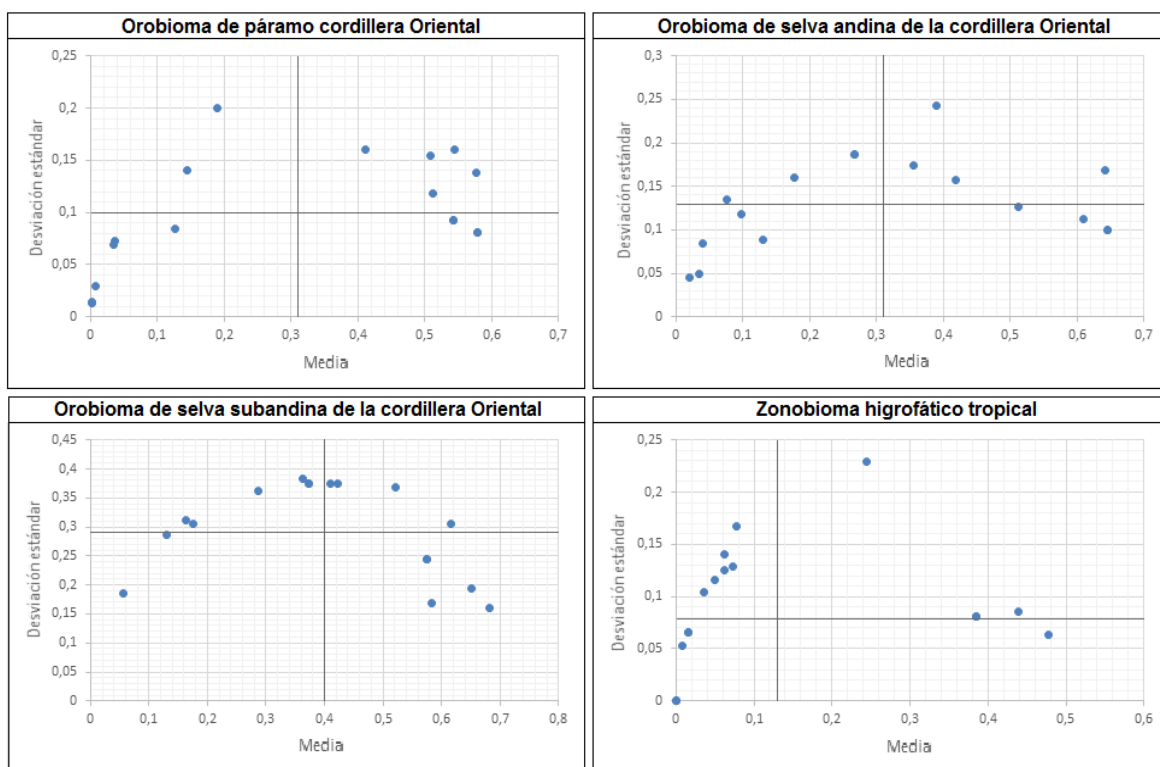


Fuente: Autora.

Teniendo en cuenta que el método para seleccionar las zonas con mayor estabilidad ambiental en el complejo de páramos Guantiva – La Rusia fue desarrollada con base en la metodología propuesta por Robert A. Washington et al. En el artículo titulado *“la cuantificación de la resistencia ecológica de zonas áridas uso de digital teledetección”* [5], se realizó un “análisis de varianza media”, el cual se puede utilizar para describir y cuantificar los regímenes dinámicos de la vegetación en respuesta de la perturbación que haya sufrido.

Por lo anterior, se realizaron cuatro dispersogramas correspondientes a los biomas estudiados (ver gráfica 4), para así determinar las zonas con mayor estabilidad ambiental respecto a los cuatro casos propuestos en la metodología nombrada en el numeral 3.1.8. “determinación de las zonas con mayor estabilidad ambiental” (ver tabla 7).

Gráfica 4: Dispersogramas de los biomas para el mes de febrero, desde el año 2000 hasta el 2016.



Fuente: Autora.

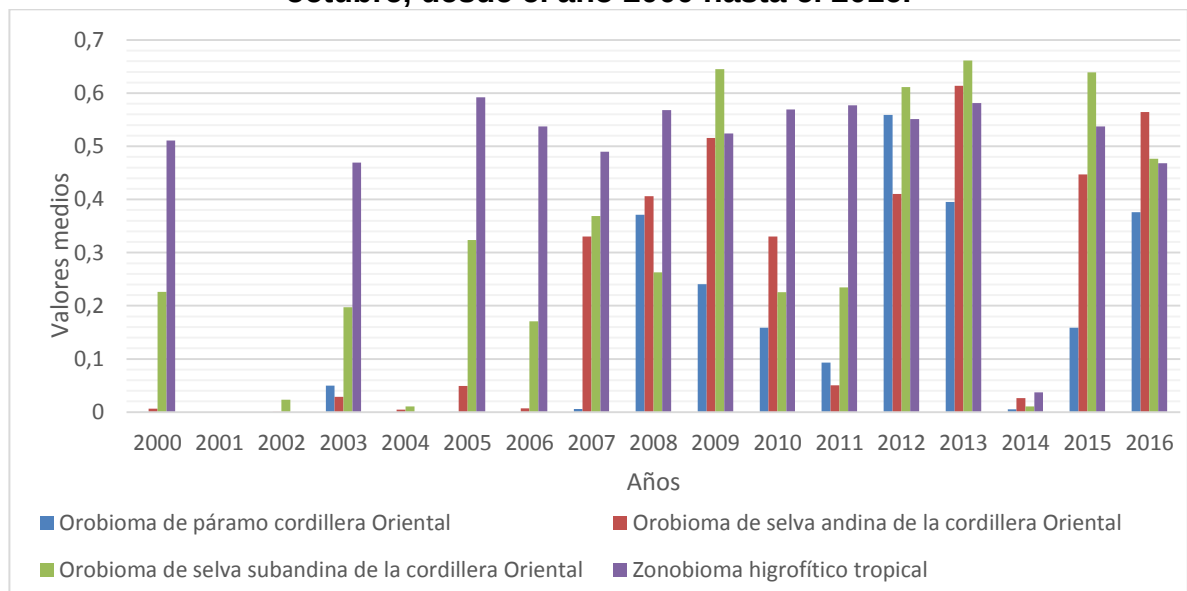
Considerando que el cuadrante ideal para clasificar el bioma como la zona con mayor estabilidad ambiental es el cuarto (la parte sur oriental de cada dispersograma), se puede concluir que ninguno de los cuatro biomas en su totalidad es una zona estable, ya que gran parte de los valores registrados del NDVI se encuentran presentes en los demás cuadrantes, sin embargo, el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental es el que mayor zonas de estabilidad ambiental presenta, puesto que más de la mitad de los valores registrados se encuentran presentes en los cuadrantes tres y cuatro (ver imagen 16), seguidos del orobioma de páramo y el de selva andina de la cordillera oriental (respectivamente). Así mismo, se puede concluir que el orobioma con menor estabilidad ambiental es el zonobioma higrofático, ya que más de la mitad de los valores de NDVI registrados, se encuentran presentes en los cuadrantes uno y dos; clasificados con baja cobertura vegetal y que se han mantenido así en el tiempo, además que presentan otro tipo de coberturas en la misma zona.

4.2.2. Análisis estadístico para el mes de octubre.

La gráfica 5 ilustra el comportamiento que tienen los valores medios del NDVI en los cuatro biomas estudiados para el mes de octubre, en este segundo periodo del

año se sesgaron valores del NDVI debido a que las imágenes descargadas obtenían mayor nubosidad que las del primer semestre del año (febrero), sin embargo, este comportamiento se debe a las anomalías registradas en la serie de tiempo para este mes.

Gráfica 5: Comportamiento de los valores medios de NDVI para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.

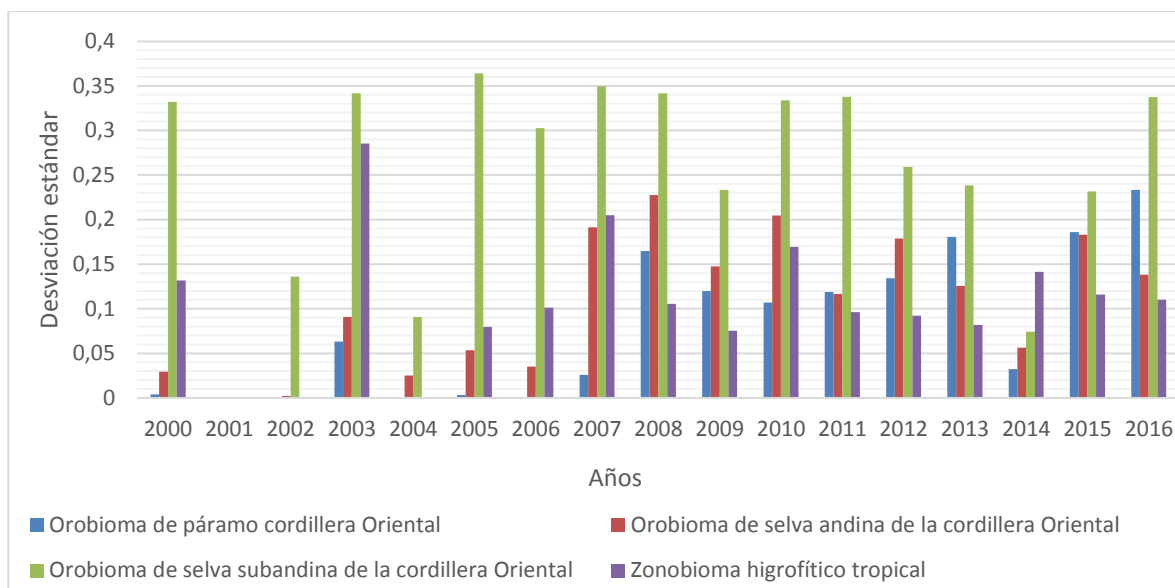


Fuente: Autora.

En la gráfica anterior, se puede observar como la respuesta del NDVI para el año 2001 y 2002 fue muy baja (siendo nula para el primer año), alcanzando valores de 0.02 para el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental, esto se debe a que en estos años se registró el fenómeno de la niña con efectos moderados, por tanto la nubosidad para esta fecha aumento y se perdieron más de la mitad de los valores arrojados para el NDVI, sin embargo, se puede observar como en los demás años se presenta una alta respuesta del zonobioma higrofitico tropical, seguido del orobioma de selva subandina de la cordillera oriental.

Al igual que en el primer semestre del año, la gráfica 6 permite evidenciar la relación inversa que tiene la desviación estándar y los valores medios del NDVI para los cuatro biomas estudiados, ya que, para las fechas en las que se registra los valores medios más altos, también se registra la menor dispersión de datos (desviación estándar), es decir, para los años que presentan altos valores medios; 2009 y 2013, (ver gráfica 5), en la gráfica seis son los que menores valores de dispersión de datos manifiestan.

Gráfica 6: Comportamiento de la desviación estándar de NDVI para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.

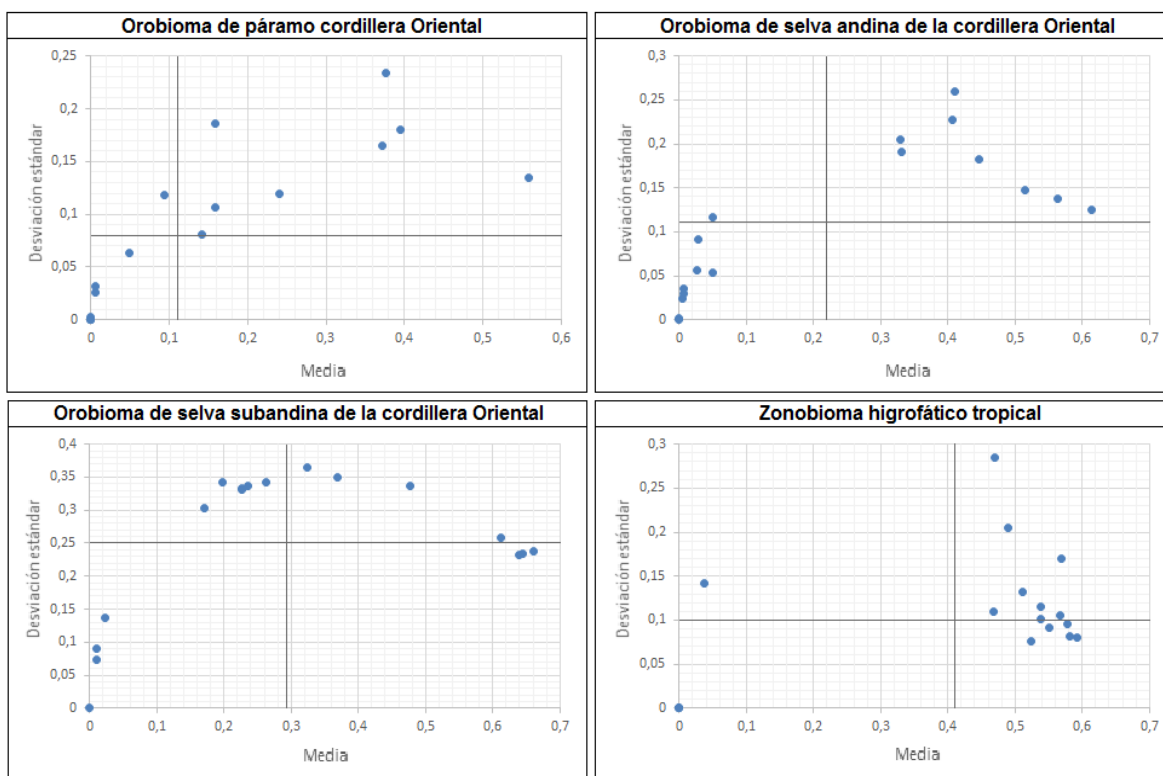


Fuente: Autora.

Por otra parte, la gráfica 6 ilustra el comportamiento que tiene la desviación estándar del NDVI en los cuatro biomas estudiados para el mes de octubre, se puede observar de manera general que el comportamiento es regular, puesto que, dependiendo de la cantidad que aumente entre un año a otro, será la total de valores con los que decrecerá la gráfica. En otro orden de ideas, en el segundo semestre del año se evidencia mayor dispersión de datos para el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental y como mínimos el orobioma de páramo, revelando de este modo, que el primero tiene una dispersión de los datos mayor que los demás orobiomas.

La grafica 7 ilustra los dispersogramas correspondientes a los cuatro biomas estudiados para el segundo semestre de la serie de tiempo analizada, allí se puede ver que a diferencia del mes de febrero, la mayoría de los datos estadísticos arrojados de las imágenes NDVI se encuentran ubicados en el tercer y cuarto cuadrante del dispersograma, indicando de este modo que estas zonas se encuentran en condiciones con alta cobertura vegetal, además que en algunos casos (cuadrante tres), tienen presencia de otras coberturas.

Gráfica 7: Dispersogramas de los biomas para el mes de octubre, desde el año 2000 hasta el 2016.



Fuente: Autora.

Por lo anterior, el zonobioma higrofitico tropical es el que cuenta con mayores zonas de estabilidad ambiental, puesto el 98% de los valores registrados se encuentran presentes en los cuadrantes tres y cuatro (ver imagen 16 para saber la ubicación de los cuadrantes), seguidos del orobioma de selva andina y el de páramo de la cordillera oriental (respectivamente). Así mismo, se puede concluir que el orobioma con menor estabilidad ambiental es el orobioma de selva subandina de la cordillera oriental, sin embargo, este no presenta condiciones críticas como se evidenció en el primer semestre de los años estudiados, ya que el 40% de los valores estadísticos de la imagen NDVI se encuentran en el cuadrante tres y cuatro.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los datos estadísticos del NDVI, se pudo observar que la tendencia de las zonas con mayor estabilidad ambiental en el complejo de páramos Guantiva – La Rusia varía respecto a las condiciones climáticas y las anomalías que se hayan manifestado, ya que los biomas estudiados son sensibles a las pequeñas variaciones. Se puede evidenciar en las gráficas, como los fenómenos de niño y niña afectaron la tendencia que seguían los valores en la serie de tiempo

analizada, por ejemplo, para los años 2001, 2010 y 2016, se presentó en condición moderada el fenómeno de la niña, por lo tanto, se obtuvieron registros altos en los valores medios del NDVI, pero con mucha dispersión de datos, evidenciando de esta manera la relación inversa de ambas variables; mientras que, para las demás épocas, no se obtuvieron registros atípicos.

Por otro lado, se pudo evidenciar que el orobioma con mayor tendencia a la estabilidad ambiental y resiliencia a estas condiciones, es el de selva subandina de la cordillera oriental, ya que este se encuentra en el cuadrante tres del dispersograma realizado para estudiar el análisis de varianza media, el cual se caracteriza por tener condiciones de cobertura vegetal altas y donde la presencia de otras coberturas también lo son, este orobioma no obtuvo variaciones significativas para los dos meses de los años estudiados, como lo que se evidenció con el zonobioma higrofítico tropical, el cual presentó malas condiciones de NDVI para el primer semestre de los años y excelentes para el segundo semestre; este comportamiento se relaciona a la cantidad de valores estadísticos perdidos en el momento de enmascarar las imágenes, ya que, para varios años de la serie de tiempo estudiada no se tenía ni la mitad de información.

6. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que para el mes de octubre correspondiente al segundo semestre del año se sesgaron muchos datos debido a la cantidad de nubosidad presente, se recomienda realizar estos estudios en temporadas secas con pocas probabilidades de lluvias (como se evidenció en el mes de febrero), para de este modo tener comparaciones significativas y una certeza mayor de los resultados obtenidos.

En consideración con los resultados obtenidos, es recomendable realizar este tipo de estudios en varias épocas del año para tener una mayor amplitud de los valores y así reconocer con mayor certeza la tendencia de los datos estadísticos del NDVI, es decir, se podría estudiar como mínimo cuatro meses del año (febrero, mayo, agosto y noviembre), de este modo se tendría un mejor seguimiento del comportamiento de los biomas, debido a que, en la serie de tiempo estudiada en este documento, se pierde información como el crecimiento de las plantas o la afectación de ellas durante una época de sequía, dado que, algunas especies vegetales presentan mayor sensibilidad a estas alteraciones climáticas y por tanto su verdosidad disminuye, lo cual, afecta directamente el nivel de reflectancia de estas coberturas, por consiguiente, no se presentan los mismos valores

registrados por el NDVI y por ende éstos disminuyen notoriamente en una serie de tiempo muy lejana; tal y como se evidencio en este estudio, el cual analizaba en febrero y octubre el comportamiento del NDVI.

Considerando que las imágenes satelitales son matrices de celdas llamadas pixel y que estos representan un área geográfica determinada que varía en función al tipo de satélite y sensor que la haya tomado, se recomienda utilizar otro tipo de sensor remoto que tenga un tamaño del pixel menor, ya que el espectro radiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), cuenta con una resolución espacial de 250, lo que indica que el tamaño de pixel tiene una cobertura de 250 m, lo cual hace que se pierda mucha información al enmascarar las nubes y/o recortar las imágenes, por ello, si se quiere tener una mayor exactitud de los datos, se recomienda utilizar otro tipo de imágenes como las Landsat que recopilan su información con otro tipo de sensores.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Armenteras, F. Gast y H. Villareal, «Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia,» *Biological Conservation*, 2003, pp. 245-256.
- [2] Avella Muñoz, Andres ; Gomez Anaya, Wilson Fernando;, «Fundación Natura Colombia,» [En línea]. [Último acceso: 08 Noviembre 2016].
- [3] C. E. Cadena Vargas, J. Otero García, A. Torres Perdigón y . T. Van der Hammen, «Distrito páramos de Boyacá. Complejo Guantiva - La Rusia,» de *Atlas de páramos de Colombia*, Bogotá D.C., Grey Comercializadora Ltda., 2007, pp. 73 - 75.
- [4] Solano, Clara; Calle, Zoraida; Roa , Carolina;, *Estrategia de desarrollo sostenible. Corredor de Conservación Guantiva-La Rusia-Iguaque*, Boyacá, Santander, Colombia, Bogotá: Fundación Natura Colombia.
- [5] R. A. Washington Allen , R. D. Ramsey , N. E. West y B. E. Norton, «Quantification of the Ecological Resilience of Drylands Using Digital Remote Sensing,» *Ecology and Society*, vol. 13, nº 33, 2008.
- [6] «Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC,» 01 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.igac.gov.co/> [Último acceso: 01 Noviembre 2016].
- [7] E. Alcaldía de Pipa, «MEMORIAS RUTA DIDÁCTICA “Conozcamos Nuestros Páramos”,» Congreso Nacional de Páramos, Duitama, Colombia, 2009.
- [8] C. A. R. d. Santander, «Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS,» 12 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://cas.gov.co/index.php/guantiva.html>. [Último acceso: 28 Agosto 2016].
- [9] A. V. H. Instituto de investigación de recursos biológicos y Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, «Instituto Humboldt,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/4.pdf>.
- [10] IGAC, «Sistema de información geográfica para la planeación y el ordenamiento territorial (SIG-OT),» [En línea]. Available: http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/frames_pagina.aspx. [Último acceso: 01 Diciembre 2016].
- [11] «Teledet,» [En línea]. Available: <http://www.teledet.com.uy/>. [Último acceso: 05 Septiembre 2016].

- [12] R. Herz, «Procesamiento digital de imágenes de satélite para el reconocimiento de patrones en los manglares,» Instituto Oceanográfico, Universidad de Sao Paulo,, Brasil, 1999.
- [13] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial - INTA y Ministerio de Defensa, Gobierno de España , «Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de imágenes de observación de la tierra - CREPAD,» 2007. [En línea]. Available: <http://crepadweb.cec.inta.es/es/plataformas/modis.html>. [Último acceso: 05 Septiembre 2016].
- [14] B. Maccherone, «Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS,» NASA, [En línea]. Available: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>. [Último acceso: 05 Septiembre 2016].
- [15] Tomas Bolaños Silva, «Biodiversidad – Servicios ecosistémicos; Relación con las ciudades,» Instituto Humboldt Colombia, Medellin, 2012.
- [16] . J. Campell y R. Wynne, Inroduction to remote sensing, New York : Guilford Press, 1944, p. 228.
- [17] Comision Nacional de Actividades Espaciales - CONAE, «Índices espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI,» CONAE, 2016.
- [18] Instituto Nacional de estadística y geografía de México, «Imágenes del territorio,» [En línea]. Available: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/>. [Último acceso: 12 Noviembre 2016].
- [19] Consultora ScanTerra, « ScanTerra (Argentina),» 2006. [En línea]. Available: http://www.scanterra.com.ar/conozca_mas.html#imagen. [Último acceso: 12 Noviembre 2016].
- [20] E. Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial, Segunda edición, Madrid, España: RIALP, S.A., 1990.
- [21] J. Álvarez, Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM., Bogotá D.C., Colombia, 2011.
- [22] O. E. Rodriguez Chavez y H. A. Arredondo Bautista, «Manual para el manejo de procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto

MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil.,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2005.

[23] Pueblo Colombiano, «Constitución política de Colombia,» 1991. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4125>. [Último acceso: 17 Noviembre 2016].

[24] C. d. Colombia, «Ley 99 de 1993,» 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>. [Último acceso: 11 Noviembre 2016].

[25] Presidente de la república (Álvaro Uribe), «Decreto 208 de 2004,» 27 Enero 2004. [En línea]. Available: <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/68ab5a00429cf8ef9adcbf319c499db2/Dec208-2004.pdf?MOD=AJPERES>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].

[26] I. A. V. Humboldt, Servicios ambientales y valoración económica en las reservas naturales de la sociedad civil, Cali, 2005.

[27] B. E. Alzate, «Introducción al procesamiento de imágenes digitales.,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/203511609/introduccion-procesamiento-imagenes-satelitales>. [Último acceso: 04 Noviembre 2016].

[28] Universidad de Piura, Índices de vegetación., Miraflores, Perú: Universidad de Piura.

[29] M. Abaurrea Pereda , «Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra,» de "material y métodos", Navara, España., Universidad Pública de Navarra - UPNA, 2013, pp. 11 - 12.

[30] J. Anaya, E. Chuvieco y A. Palacios, «Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS,» Revista de Teledetección, pp. 5-22, 2008.

[31] E. Cabrera , G. Galindo y . D. Vargas, Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escala Gruesa y Fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales - IDEAM-, Bogotá, Colombia, 2011.

[32] NASA; USGS;, «Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC),» 14 Abril 2014. [En línea]. Available: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1. [Último acceso: 09 Noviembre 2016].

8. ANEXOS

ANEXO 1: COMPROBANTE DE ASISTENCIA